

Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года

Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	PIETRO ZUNINO
Заместитель главного редактора	АХМЕТОВА И.Г.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	БАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ООО «45», г. Казань,
Адрес типографии:	420015, г. Казань, ул. Жуковского, 28а, помещ.1

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2021
Т.23, № 1
Январь-февраль

ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Министерство образования и науки РФ
Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В журнале публикуются работы, соответствующие группе специальностей 05.14.00 – «Энергетика», 05.09.00 – «Электротехника», 05.11.00 – «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы».

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы. Язык публикаций: русский, английский.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АРАКЕЛЯН Э.К.
БУХМИРОВ В.В.
ГУМЕРОВ Ф.Х.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ИВШИН И.В.
ЛАПТЕВ А.Г.
ТЮТИКОВ В.В.
ЧИЧИРОВА Н.Д.
ЗВЕРЕВА Э.Р.
ЯКИМОВ Н.Д.
ФРОЛОВ В.Я.
РАССЫЛКИН А.С.

КОРОВКИН Н.В.
ВИНОГРАДОВ А.В.
ДОВГУН В.П.
СИНЮКОВА Т.В.
ЩИННИКОВ П.А.
DESHPANDE PRAVIN
MICHAIL KOLCUN
НИКОЛАЕВА Л.А.
САДЫКОВ М.Ф.
МИНУЛЛИН Р.Г.

Свидетельство о регистрации СМИ:

журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2021
Vol. 23, № 1
January-February
ISSN 1998-9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: PIETRO ZUNINO

The journal covers fundamental and applied research, as well as discussion issues on power engineering and related industries and science.

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials. Language of publications: Russian, English.

Sections:

POWER ENGINEERING

ELECTRIC ENGINEERING

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND
SYSTEMS

Editorial board:

EDIK K. ARAKELYAN
VYACHESLAV V. BUKHMIROV
FARID M. GUMEROV
YURY V. VANKOV
IGOR V. IVSHIN
ANATOLY G. LAPTEV
VLADIMIR V. TYUTIKOV
NATALIYA D. CHICHIROVA
ELVIRA R. ZVEREVA
NIKOLAY D. YAKIMOV
VLADIMIR YA. FROLOV
ANTON RASSÖLKIN

NIKOLAY V. KOROVKIN
ALEXANDR V. VINOGRADOV
VALERY P. DOVGUN
TATYANA V. SINYUKOVA
PAVEL A. SHCHINNIKOV
DESHPANDE PRAVIN
MICHAIL KOLCUN
LARISA A. NIKOLAEVA
MARAT F. SADYKOV
RENAT G. MINULLIN

Address

Tel./fax:

Email:

Site:

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation
+7 (843) 527-92-76
problems_ener@mail.ru
<https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

ФЕДОТОВ А.И., ФЕДОТОВ Е.А., АБДУЛЛАЗЯНОВ А.Ф. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок.	3
АХМЕД З. АБАСС., ПАВЛЮЧЕНКО Д.А., ЛЕСС В.М. Математическая модель оптимального размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом .	18
КУДРЯШОВ А.Н., КОВАЛЬ Т.В., ИЖГАНЯЙТИС М.И. Опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области.	33
МУСТАФИН Р.Г., ПИСКОВАЦКИЙ Ю.В., СИРАЗУТДИНОВ Ф.Р., ГУБАЕВ Д.Ф., ГАВРИЛЕНКО А.Н. Разработка метода определения витковых замыканий в обмотке трёхфазного трансформатора	46
ХАЙБУЛЛИНА А.И., ЗИННАТУЛЛИН Н.Х., ИЛЬИН В.К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки.	59
БАУБЕК А.А., ГРИБКОВ А.М., ЖУМАГУЛОВ М.Г., ГЛАЗЫРИН С.А., ДОЛГОВ М.В. Исследование водо-мазутной эмульсии при использовании диспергатора волновой обработки	68
ДРАКО М.А., БАРАЙШУК С.М., ПАВЛОВИЧ И.А. О разработке смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта.	80
ГРАЧЕВА Е.И., НАУМОВ О.В., ГОРЛОВ А.Н., ШАКУРОВА З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутризаводского электроснабжения.	93
САФОНОВ Е.П., ФРОЛОВ В.Я. Особенности переходных процессов в генераторных цепях мощных электротехнических комплексов.	105
ДРЕМИЧЕВА Е.С., ЗВЕРЕВА Э.Р., БУРГАНОВА Ф.И., ЗВЕРЕВ Л.О. Перспективы технологии совместного сжигания биомассы и угля на объектах энергетики.	119
МИРСАЛИХОВ К.М., ГРИБКОВ А.М., ЧИЧИРОВА Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб.	131

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ФЕДОТОВ А.И., ВАГАПОВ Г.В., АБДУЛЛАЗЯНОВ А.Ф., ШАРЯПОВ А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи.	146
СОЛУЯНОВ Ю.И., АХМЕТШИН А.Р., СОЛУЯНОВ В.И. Энергоресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок.	156
СИНЮКОВА Т.В., МЕЩЕРЯКОВ В.Н., СИНЮКОВ А.В. Исследование систем частотного управления для подъемно-транспортных механизмов.	167
ГОТОВКИНА Е.Е., ЯБЛОКОВ А.А., СМИРНОВ Н.Н., ПАНАЩАТЕНКО А.В., ЛЕБЕДЕВ В.Д., ДОБРЯГИНА О.А. Исследование теплового состояния автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) Кв.	182
САВЕНКО А.Е., САВЕНКО П.С. Использование угла нагрузки синхронных генераторов для устранения обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах.	197

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

FEDOTOV AI, FEDOTOV EA, ABDULLAZYANOV AF. Use of electrochemical energy storage systems in autonomous power supply systems to reduce fuel consumption of power installations.	3
AHMED Z. ABASS, PAVLYUCHENKO DA, LESS VM. Mathematical model of optimal placement of a hybrid power plant with a combined cycle.	18
KUDRYASHOV AN, KOVAL TV, IZHGANAYTIS MI. Experience of combustion composite fuel at a thermal power station in the Irkutsk region.	33
MUSTAFIN RG, PISKOVATSKY YUV, SIRAZUTDINOV FR, GUBAEV DF, GAVRILENKO AN. Development of a turn-to-turn fault detection method in the three-phase transformer's winding.	46
HAIBULLINA AI, ZINNATULLIN NX, ILYIN VK. Improving heat exchanger efficiency using the pulsed method of cleaning.	59
BAUBEK AA, GRIBKOV AM, ZHUMAGULOV MG, GLAZYRIN SA, DOLGOV MV. Study of water-oil emulsion using wave treatment dispersant.	68
DRAKO MA, BARAISHUK SM, PAVLOVICH IA. Compound mixtures based on hydrolyzed polyacrylonitrile reducing soil electrical resistivity.	80
GRACHEVA EI, NAUMOV OV, GORLOV AN, SHAKUROVA ZM. Algorithms and probabilistic models of parameters of operation of in-plant power supply.	93
SAFONOV EP, FROLOV VYA. Features of fault transient's in generator network of powerful electric power stations.	105
DREMICHEVA ES, ZVEREVA ER, BURGANOVA FI, ZVEREV LO. Prospects of the technology of joint combustion of biomass and coal at energy facilities.	119

ELECTRICAL ENGINEERING

FEDOTOV AI, VAGAPOV GV, ABDULLAZYANOV AF, SHARYAPOV AM. Digital power lines faults monitoring system.	131
SOLUYANOV YUI, AKHMETSHIN AR, SOLUYANOV VI. ENERGY-RESOURCE-SAVING EFFECT IN THE ELECTRIC SUPPLY SYSTEMS OF RESIDENTIAL COMPLEXES FROM UPDATING THE ELECTRIC LOAD REGULATIONS.	156
SINYUKOVA TV, MESHCHERYAKOV VN, SINYUKOV AV. Research of frequency control systems for lifting and transport mechanisms.	167
GOTOVKINA EE, YABLOKOV AA, SMIRNOV NN, PANASHATENKO AV, LEBEDEV VD, DOBRYAGINA OA. Studying the thermal condition of an automated 6 (10) KV electric power fiscal metering location.	182
SAVENKO AE, SAVENKO PS. Use of load angle of synchronous generators to eliminate power exchange oscillations in autonomous electrical complexes.	197

ЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.311.26

DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ЭНЕРГОУСТАНОВОК

А.И. Федотов, Е.А. Федотов, А.Ф. Абдуллазянов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

e-mail:fed.ai@mail.ru, e-mail:evfedotov2002@yandex.ru

e-mail:ainyr1582@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. На удаленных территориях при отсутствии централизованного электроснабжения энергосбережение является одним из ключевых факторов успешного развития региона. Применение электрохимических накопителей энергии способствует экономии жидкого или газообразного топлива энергоустановок, используемых в автономных системах электроснабжения. Отечественные производители создали мобильные системы накопления энергии модульного типа, предназначенные к быстрому их развертыванию практически на любой территории и работающие в диапазоне от нескольких сотен киловатт в единичном исполнении до комплексов в десятки мегаватт. МЕТОД. Использован метод неопределенных множителей Лагранжа в приложении к профилям мощности нагрузки дискретного вида для выбора параметров электрохимического накопителя энергии, обуславливающих минимизацию расхода топлива. Полученная математическая модель использует профили мощности нагрузки, сформированные по её продолжительности, и ориентирована на простейший алгоритм численного поиска экстремума функции путем изменения её аргумента, не решая оптимизационного нелинейного уравнения. В методику включен выбор длительности разряда накопителя энергии. РЕЗУЛЬТАТ. Показано влияние накопителя энергии на снижение расхода топлива. Методика справедлива для выпуклых расходных характеристик энергоустановок. В условиях прогнозируемых изменений профилей мощности (рабочий/выходной дни) сценарии оптимального управления рассчитываются индивидуально. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование предложенной математической модели обеспечивает быстрые расчеты экономической оценки использования электрохимических накопителей энергии. Для газопоршневых энергоустановок, где они обязательны для стабилизации параметров качества электроэнергии, их коммерческая привлекательность существенно выше, чем для энергоустановок другого вида.

Ключевые слова: электрохимический накопитель энергии, литий-ионная аккумуляторная батарея, энергоустановка, система электроснабжения, профиль мощности нагрузки, экономия топлива.

Для цитирования: А.И. Федотов, Е.А. Федотов, А.Ф. Абдуллазянов. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 3-17. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17.

USE OF ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS IN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS TO REDUCE FUEL CONSUMPTION OF POWER INSTALLATIONS

AI. Fedotov, EA. Fedotov, AF. Abdullazyanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

e-mail:fed.ai@mail.r, e-mail:evfedotov2002@yandex.ru

e-mail:ainyr1582@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* In remote areas in the absence of centralized power supply, energy conservation is one of the key factors for the successful development of the region. The use of electrochemical energy storage systems contributes to the saving of liquid or gaseous fuel of power plants used in autonomous power supply systems. Domestic manufacturers have created modular-type mobile energy storage systems designed for their rapid deployment in almost any territory and operating in the range from several hundred kilowatts in a single design to complexes of tens of megawatts. *METHOD.* The method of indefinite Lagrange multipliers was used in application to the power profiles of the load of a discrete form to select the parameters of the electrochemical energy storage, causing the minimization of fuel consumption. The obtained mathematical model uses the power profiles of the load, formed by its duration, and is focused on the simplest algorithm for the numerical search for the extremum of a function by changing its argument, without solving the optimization nonlinear equation. The method includes the choice of the duration of the discharge of the energy storage. *RESULTS.* The influence of the energy storage device on the reduction of fuel consumption is shown. The technique is valid for convex consumption characteristics of power plants. In the context of predicted changes in power profiles (work / weekend days), optimal control scenarios are calculated individually. *CONCLUSION.* The use of the proposed mathematical model provides quick calculations of the economic assessment of the use of electrochemical energy storage. For gas piston power plants, where they are required to stabilize the parameters of power quality, their commercial attractiveness is significantly higher than for power plants of another type.

Key words: *electrochemical energy storage, lithium-ion storage battery, power plant, power supply system, load power profile, fuel economy.*

For citation: Fedotov AI, Fedotov EA, Abdullazyanov AF. Use of electrochemical energy storage systems in autonomous power supply systems to reduce fuel consumption of power installations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):3-17. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17.

Введение

В последние годы наблюдается высокая скорость распространения по всему миру электрохимических накопителей энергии (НЭ), при этом имеет место как рост мощности/энергоемкости отдельных установок до сотен мегаватт и мегаватт-часов с целью размещения в крупных энергосистемах, так и их разукрупнение до нескольких десятков киловатт/киловатт-часов для использования в частных домохозяйствах [1, 2]. Так, американская проектная компания *8minute Solar Energy* объявила о подписании договора со швейцарской инвестиционной компанией *Capital Dynamics* о совместном финансировании и долевом участии в строительстве на юге штата Калифорния совмещенного энергокомплекса (*solar-plus-storage*) *Eland Solar & Storage Center*. В состав энергокомплекса войдут СЭС мощностью 400 МВт и накопитель энергии мощностью 300 МВт и энергоемкостью 1200 МВт·ч [3].

С другой стороны, австралийская компания *Western Power* подключила накопитель энергии *Tesla* мощностью 116 кВт и энергоемкостью 464 кВт·ч к электрическим сетям населенных пунктов Элленбрук и Фалькон. В результате они предоставили возможность владельцам местных домохозяйств зарезервировать за собой ячейки «виртуального» хранилища электроэнергии энергоемкостью 6 кВт·ч или 8 кВт·ч по цене \$ 1,60 или \$ 1,90 в день соответственно. За указанную плату участники проекта могут использовать «зарезервированные» ячейки *PowerBank* для аккумуляции избыточной электроэнергии, выработанной установленными у них солнечными панелями, в часы высокой солнечной активности и потреблять электроэнергию в зарезервированном объеме в часы низкой солнечной активности, тем самым экономя на приобретении собственной системы хранения энергии [3].

Современная архитектура российской электроэнергетики представляет собой сочетание централизованного энергоснабжения от крупных электростанций с мощными блоками, соединёнными высоковольтными магистральными электрическими сетями напряжением 220 кВ и выше, и локальных энергетических систем с распределённой генерацией от энергоустановок малой мощности (менее 25 МВт) [4].

Согласно экспертным оценкам, на долю распределенной генерации к настоящему времени приходится около 5-10% от суммарной выработки электроэнергии в России, что можно рассматривать как устойчивый тренд формирования новой энергетики, основанной

на цифровых технологиях. Основным фактором, способствующим смене технологической парадигмы, является растущая неэффективность российского централизованного электроэнергетического сектора вследствие общего снижения загрузки крупных электростанций с соответствующим ростом себестоимости производимой электроэнергии. Существенный фактор, повышающий привлекательность распределенной генерации для представителей самых разных отраслей – это динамика цен на мощность и динамика роста тарифов на услуги по передаче электроэнергии [5, 6].

В связи с тенденцией роста цены на газ и энергоносители значимость высокоэффективных технологий, к которым относится формирование локальных систем электроснабжения на базе применения дизельных, газопоршневых и газотурбинных энергоустановок, будет постоянно повышаться. Драйвером роста их эффективности может стать применение электрохимических НЭ на основе литий-ионных аккумуляторных батарей. Наличие энергоемких и мощных накопителей в качестве промежуточного устройства между генерацией энергии и её потреблением позволило бы освободиться от жесткого баланса между её производством и потреблением и обеспечить наиболее экономичные режимы работы энергоустановок. Экономия жидкого топлива особенно актуальна для северных территорий страны, где в его доставке участвуют практически все виды транспорта [7-11].

Постановка задачи

Наличие попутного нефтяного газа даже при необходимости его очистки делает безальтернативным использование на этих территориях газопоршневых и газотурбинных энергоустановок для электроснабжения промышленных и бытовых потребителей электроэнергии [12]. Применение электрохимических НЭ эффективно на объектах нефтегазовой промышленности, поскольку позволяет обеспечить:

- запуск электростанции «с нуля» после ее внезапного выхода из работы из-за аварии в сети (остановка турбин);
- снять перегрузки распределительной сети при прохождении максимумов нагрузки (особенно экстраординарных: резкое похолодание, в режимах высокого риска нарушения электроснабжения из-за природных факторов или аварийного состояния сети);
- обеспечить устойчивую работу газопоршневых энергоустановок (ГПУ) при набросах нагрузки (например, при пусках электродвигателей) [3, 13];
- в режимах форсировки реактивной мощности при провалах напряжения поддерживать напряжение на нагрузке в целях предотвращения «опрокидывания» асинхронных двигателей и отключения электромагнитных расцепителей автоматов 0,4 кВ [10, 14].

– Развитие и совершенствование технологий создания и производства новых типов литий-ионных батарей способствует их практически безальтернативному применению в промышленных накопителях, предназначенных к выработке электроэнергии продолжительностью от нескольких десятков секунд и выше [15-21].

ООО «Системы накопления энергии», г. Новосибирск, является лидером в Российской Федерации по разработке электрохимических систем НЭ. Компанией разработаны технические решения НЭ на основе литий-ионных аккумуляторных батарей в шкафом и контейнерном исполнении [23], последнее из которых наиболее предпочтительно для быстрого развертывания систем локальной генерации, рис. 1.



а)



б)

Рис. 1 Контейнерное исполнение электрохимического НЭ
а – контейнер с кондиционером; б – стойка с аккумуляторными батареями

Fig.1. Container version of the electrochemical device
a – container with air conditioning; б – battery rack

Методы

Ниже предлагается методика выбора оптимальных параметров НЭ, используемых в составе энергоустановок, в целях снижения расхода топлива.

Рассмотрим параллельную работы электростанции в локальной системе электроснабжения с одним общим накопителем энергии, рис. 2, где приняты обозначения: *BS* – выключатель накопителя энергии, *TS* – согласующий трансформатор, *I* – двунаправленный инвертор, *EB* – аккумуляторная батарея. Все эти элементы образуют в совокупности электрохимический накопитель энергии *ES*. В двигатели энергоустановок *M1*, ..., *MN* поступает топливо *Q1*, ..., *QN*. В общем случае энергоустановки могут быть разными по мощности и типу. В действительности такой случай в малой энергетике при электроснабжении изолированных территорий встречается крайне редко и далее будем считать, что все энергоустановки однотипные. Поэтому их можно условно считать одной эквивалентной энергоустановкой при решении и задачи минимизации расхода топлива. Отключение одной или нескольких энергоустановок при определенных условиях также способствует энергосбережению, но этот вопрос в настоящей статье не рассматривается.

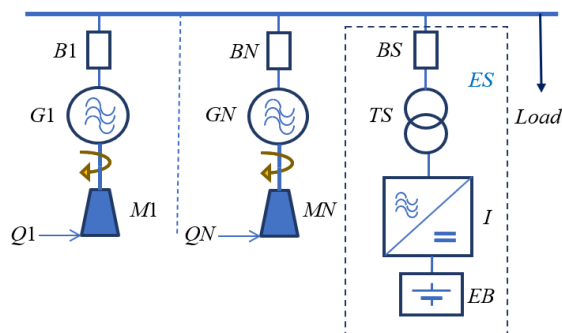


Рис. 2. Принципиальная схема электростанции с электрохимическим НЭ
Fig.2. Schematic diagram of a power plant with an electrochemical device

Предварительно необходимо определиться, на каком интервале времени рассматривается задача и каким образом стал известен график нагрузки на этом периоде. Последнее обстоятельство является главным неопределенным фактором, т.к. режим работы НЭ необходимо задавать «сейчас», а изменение нагрузки наступает «потом». Если не сформировать заранее некоторый приближенный закон управления накопителем, то можно столкнуться с ситуацией, когда НЭ уже разряжен, а именно «сейчас» необходима дополнительная генерация мощности либо по условию сохранения устойчивой работы ГПУ, либо по условию экономии топлива.

Первый фактор диктует сохранение определенного заранее заданного резерва мощности, который практически не сказывается на емкости НЭ. ГПУ чувствительны к резким изменениям нагрузки [3, 13]. На рис. 3 в качестве примера приведена нагрузочная диаграмма конкретной ГПУ типа MTU 8V4000L32 номинальной мощностью 776 кВт [23]. Диаграмма показывает максимальную величину наброса/сброса нагрузки при условии соблюдения стандарта ISO 8528-5, согласно которому для класса энергоустановок G1 допускается диапазон отклонения частоты +18/-25% (время восстановления частоты 10 с), а для класса энергоустановок G3 допускается диапазон +10/-15% (время восстановления частоты 3 с).

Так, при работе ГПУ с нагрузкой от 13% до 94% допустимо подключать ступенчато не более 5,8% мощности, что составит только 45 кВт, а для ГПУ, нагруженной на 70%, допустим сброс нагрузки 3,2%, т.е. 24,8 кВт. В динамике НЭ компенсирует нагрузку в течение нескольких секунд, которых достаточно для отработки возмущения системой регулирования газопоршневого двигателя и принятия полной нагрузки на ГПУ.

Второй фактор обуславливает необходимость формирования интервалов заряда – разряда НЭ, предполагающие достижение максимальной экономии топлива, под которые уже выбираются параметры НЭ [24, 25]. Далее выполняется технико-экономический расчет, который может их скорректировать с учетом заданного срока окупаемости инвестиций [26]. Применительно к ГПУ в качестве базового варианта, не включаемого в дополнительные затраты, принимается НЭ, обеспечивающий стабилизацию режима ГПУ при максимальном набросе нагрузки. Применительно к дизельгенераторной энергоустановке стоимость любого НЭ сразу включается в дополнительные затраты.

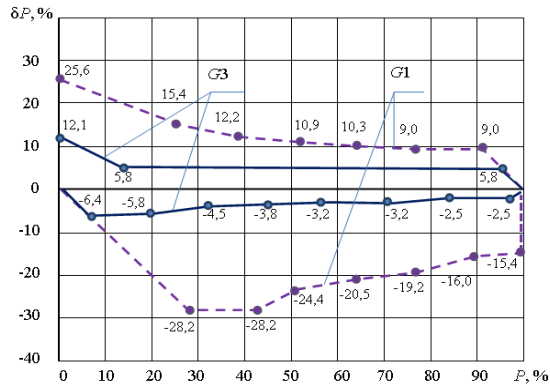


Рис. 3. Диаграмма допустимых нагрузок ГПУ MTU 8V4000L32
Fig 3. GPU load Tolerance Diagram MTU 8V4000L32

Математическая модель

Рассмотрим математическую сторону вопроса достижения максимальной экономии топлива при использовании НЭ. На рассматриваемом интервале времени повторяемости графика нагрузки $[0; T]$ должен выполняться баланс между энергией заряда W_c (отдала сеть) и разряда W_{dc} (приняла сеть) с учетом КПД, т.е. НЭ может отдать только столько энергии, сколько в него поступило, иначе от разрядится:

$$\eta \int_0^T P_c dt = \eta W_c = \frac{1}{\eta} W_{dc} = \frac{1}{\eta} \int_0^T P_{dc} dt, \quad (1)$$

где η – КПД системы накопления энергии, P_c – мощность, направляемая из сети в НЭ; ηP_c – принятая НЭ зарядная мощность; P_{dc} – мощность, принимаемая сетью от НЭ.

На практике имеют дело с дискретными замерами, когда суточные профили мощности записывается с усреднением на получасовых интервалах времени. По результатам измерений удобно переходить к профилю мощности по её продолжительности, рис. 4.

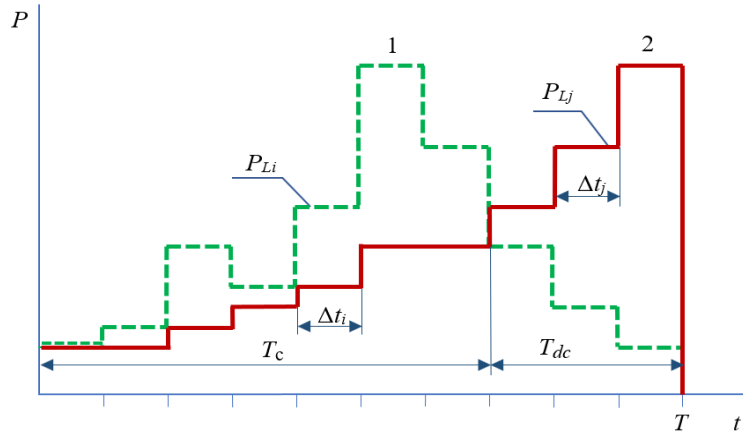


Рис. 4. Диаграммы профиля мощности нагрузки
1 – профиль мощности нагрузки на интервале наблюдения T ,
2 – профиль мощности нагрузки по её продолжительности,
 P_L – мощность нагрузки.

Fig.4. Load Power profile diagrams
1– load power profile at the observation interval T ,
2– load power profile by its duration
3– P_L -load capacity

Считаем, что на интервале времени T_c происходит заряд НЭ постоянным по величине током (ООО «Лиотех» рекомендует ток заряда 0,2С [27]), а на интервале времени T_{dc} происходит его разряд. Баланс энергии (1) можно записать в следующем виде

$$\eta \sum_i P_{ci} \Delta t_i = \frac{1}{\eta} \sum_j P_{dcj} \Delta t_j. \quad (2)$$

Поскольку при постоянном токе заряда питающее напряжение практически не изменяется (на общих шинах оно поддерживается автоматическим регулятором возбуждения генератора), то мощность заряда P_c также постоянная. Тогда левая часть выражения (2) может быть преобразована к следующему виду

$$\eta \sum_i P_{ci} \Delta t_i = \eta P_c T_c. \quad (3)$$

Полагая на рис. 2, что $N=1$ (или же рассматривается эквивалентная энергоустановка), запишем оптимизационное уравнение Лагранжа

$$S = \sum_{i,j} q_{i,j} \Delta t_{i,j} + \sum_i \lambda_i L_i + \sum_j \lambda_j L_j + \lambda_E L_E, \quad (4)$$

где $\lambda_i, \lambda_j, \lambda_E$ – неопределенные множители Лагранжа; L, L_j, L_E – уравнения ограничений, i, j – индексы, соответствующие режиму заряда НЭ и режиму его разряда, q_i, j – удельный расход топлива энергоустановки в режимах заряда – разряда НЭ, м³/час.

Баланс мощностей на общих шинах электростанции, рис. 2, на i -ом интервале заряда НЭ описывается уравнением

$$L_i = P_i - P_{Li} - P_c = 0, \quad (5)$$

где P_i – генерируемая мощность энергоустановкой в режиме заряда НЭ;

P_{Li} – потребляемая нагрузкой мощность.

Баланс мощностей на общих шинах электростанции, рис. 2, на j -ом интервале разряда НЭ описывается уравнением

$$L_j = P_j - P_{Lj} + P_{dcj} = 0, \quad (6)$$

Баланс энергии W в цикле разряд-заряд НЭ (2) с учетом выражения (3) принимает следующий вид

$$L_E = \eta^2 P_c T_c - \sum_j P_{dcj} \Delta t_j = 0 \quad (7)$$

Таким образом, независимыми переменными являются мощность заряда P_c на всем временном интервале заряда НЭ, мощности разряда P_{dcj} на каждом интервале времени Δt_j разряда НЭ, генерируемые мощности P_i на каждом интервале времени Δt_i заряда НЭ и на P_j каждом интервале времени Δt_j разряда НЭ.

Запишем условия экстремума функции (4):

$$\frac{\partial S}{\partial P_{gi}} = \frac{\partial Q_i}{\partial P_{gi}} + \lambda_i = \frac{\partial q_i}{\partial P_{gi}} \Delta t_i + \lambda_i = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial P_{gj}} = \frac{\partial Q_j}{\partial P_{gj}} + \lambda_j = \frac{\partial q_j}{\partial P_{gj}} \Delta t_j + \lambda_j = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial P_c} = -\sum_i \lambda_i + \lambda_E \eta^2 T_c = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial P_{dcj}} = \lambda_j - \lambda_E \eta^2 \Delta t_j = 0 \quad (11)$$

Формулы (8)–(11) обеспечивают нахождение экстремума функции. Для конкретизации необходимо использовать расходную характеристику. Распространенной является аналитическая аппроксимация вида

$$q = a + bP^\beta \quad (12)$$

Если $\beta > 1$, то по уравнениям (8) – (11) находится минимальный расход топлива. Если $\beta < 1$, минимизация расхода топлива сопряжена с отключением энергоустановки в часы минимальной нагрузки и с её зарядом в часы максимальной нагрузки. Далее полагаем $\beta > 1$.

Исключая λ_j из уравнений (9) и (11), получаем

$$\frac{\partial q_j}{\partial P_{gj}} = -\lambda_E \eta^2. \quad (13)$$

Выражение (13) показывает, что на интервале времени разряда НЭ должно выполняться условие постоянства генерируемой мощности P_g :

$$P_j = P_g. \quad (14)$$

Для того, чтобы рассчитать эту мощность, свяжем её с мощностью заряда НЭ P_c , используя уравнения (6), (7) и равенство (14):

$$\eta^2 P_c T_c - \sum_j P_{dcj} \Delta t_j = \eta^2 P_c T_c - \sum_j (P_{Lj} - P_g) \Delta t_j = 0 \quad (15)$$

Отсюда получаем

$$P_g = \frac{\sum_j P_{Lj} \Delta t_j}{T_{dc}} - \eta^2 P_c \frac{T_c}{T_{dc}}. \quad (16)$$

Из уравнений (3) и (5) находим

$$-\lambda_E = \frac{1}{k_p T_c} \sum_i \frac{\partial q_i}{\partial P_i} \Delta t_i = \frac{\partial q_j}{\partial P_j} = \frac{\partial q}{\partial P_g}. \quad (17)$$

После чего, используя уравнения (5), (8) и (10), формируем систему нелинейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\eta^2 T_c} \sum_i \frac{\partial q(P_i)}{\partial P_i} \Delta t_i &= \frac{\partial q(P_g)}{\partial P_g}, \\ P_i &= P_{Li} + P_c, \\ P_g &= \frac{\sum_j P_{Lj} \Delta t_j}{T_{dc}} - \eta^2 P_c \frac{T_c}{T_{dc}}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Если использовать аналитическую аппроксимацию расходной топливной характеристики вида (12), то систему уравнений (18) можно свести к нелинейному уравнению относительно одной переменной

$$\frac{1}{\eta^2 T_c} \sum_i (P_{Li} + P_c)^{\beta-1} \Delta t_i - \left(\frac{\sum_j P_{Lj} \Delta t_j}{T_{dc}} - \eta^2 P_c \frac{T_c}{T_{dc}} \right)^{\beta-1} = 0 \quad (19)$$

Представляется, что в численных расчетах проще использовать уравнения (18), в которых под знаками сумм изменяется количество слагаемых: например, при расширении зоны разряда НЭ нагрузка P_{Li} переходит в зону разряда и конечное значение i индекса i уменьшается на 1, а конечное значение J индекса j увеличивается на 1.

Пример расчета параметров НЭ

Покажем способ определения параметров НЭ и режима работы энергоустановки без решения нелинейного уравнения (19) на конкретном примере в разрезе суток, когда заранее назначена продолжительность разряда НЭ. Энергоустановка номинальной мощностью 0,422 МВт совместно с электрохимическим НЭ работает на нагрузку, рис. 2. Профиль мощности нагрузки по её продолжительности представлен на рис. 5.

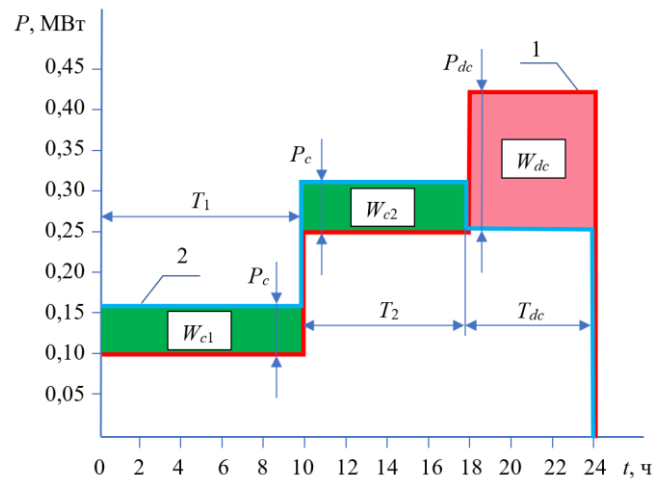


Рис. 5. Диаграмма мощностей при $\eta^2 = 0,9$

1 – профиль мощности нагрузки; 2 – профиль генерируемой мощности

Fig.5. Power diagram at $\eta^2 = 0,9$

Мощность нагрузки первой ступени равна $P_{L1} = 0,1$ МВт; второй ступени – $P_{L2} = 0,25$ МВт; третьей ступени – $P_{L3} = 0,422$ МВт; их продолжительность соответственно равна $T_1 = 10$ ч, $T_2 = 8$ ч, $T_c = T_1 + T_2 = 18$ ч, $T_3 = T_{dc} = 6$ ч. Общая продолжительность работы равна $T = 24$ ч. Для НЭ первоначально принимаем $\eta^2 = 0,75$.

Удельная расходная характеристика (12) для рассматриваемой ДЭС (размерность мощности P – мегаватты) имеет вид

$$q = a + bP^{\beta} = 22,31 + 368,57 \cdot P^{1,45}, \text{ л/ч.} \quad (20)$$

Рассчитаем мощности заряда и разряда НЭ, обеспечивающие максимальную суточную экономию топлива. Для этого составляем следующее выражение для расчета суточного расхода топлива

$$Q = a \cdot T + b \cdot \left[(P_{L1} + P_c, 45 \cdot T_1) + (P_{L2} + P_c) + P_c, 45 \cdot T_2 \right. \quad (21)$$

Подставляя в формулу (21) численные значения параметров, получаем

$$Q = 535,44 + 368,57 \cdot \left[(0,1 + P_c)^{1,45} \cdot 10 + (0,25 + P_c)^{1,45} \cdot 8 + \right. \quad (22)$$

$$\left. + (0,422 - P_{dc})^{1,45} \cdot 6 \right] \text{ л / сут}$$

Для конкретного графика нагрузки, рис. 5, из формулы (15) имеем

$$P_{dc} = \eta^2 P_c (T_1 + T_2) / T_3. \quad (23)$$

Подставляя выражение (23) в формулу (22), получаем зависимость суточного расхода топлива от величины зарядной мощности. Далее путем простого последовательного перебора значений P_c от 0 до 0,1 МВт с шагом 0,001 МВт находим минимум функции $Q(P_c)$, рис. 6.

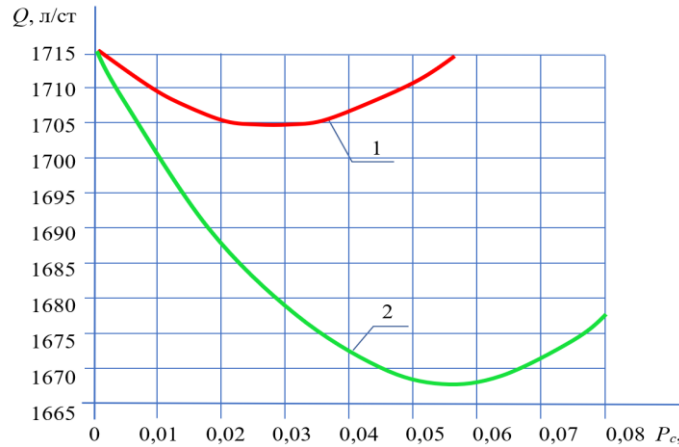


Рис. 6. Суточные расходные характеристики топлива ДЭС:

1 – характеристика при $\eta^2 = 0,75$; 2 – характеристика при $\eta^2 = 0,9$

Fig 6. Daily consumption characteristics of DES fuel:

1. – characteristics of the application $\eta^2 = 0,75$; 2– characteristics of the application $\eta^2 = 0,9$

Оба графика на рис. 6 имеют явно выраженный экстремум, который обеспечивает минимальный расход топлива при соответствующей организации процессов заряда – разряда НЭ. Оптимальному режиму работы ДГУ, график 2 на рис. 6, соответствует максимальная вырабатываемая мощность 0,305 МВт, рис. 5, на интервале времени T_2 .

Исходя из этих данных выбор параметров НЭ производится следующим образом. ООО «ЛИОТЕХ» [27] рекомендует оптимальный ток заряда для литий-ионных аккумуляторных батарей величиной 0,2С. Для рассмотренных примеров выбор накопителя осуществляется по току заряда, т.к. разряд происходит при токе, меньшем номинального:

$$I_{EC} = P_c / U_{EC} \quad (24)$$

где I_{EC} – ток аккумуляторной батареи, U_{EC} – напряжение на аккумуляторной батарее.

При $U_{EC} = 700$ В и $P_c = 56$ кВт получаем $I_{EC} = 80$ А.

Тогда номинальный ток аккумуляторной батареи в пять раз больше и составит 400 А, емкость батареи 400 А*ч. Теперь необходимо проверить её емкость на интервале T_{dc} . НЭ в режиме разряда работает 6 часов, рис. 5, и ток разряда равен $80 \cdot 2,43 \approx 200$ А, отдаваемая энергия составит 1200 А*ч. С учетом того, что аккумуляторная батарея разряжается не полностью, необходимо установить параллельно 4 батареи каждая емкостью 400 А*ч, или же путем технико-экономических расчетов проверить целесообразность установки меньшего количества батарей параллельно, но на больший номинальный ток.

В рассмотренном выше примере продолжительность разряда была фиксированной. Если расширить постановку задачи по минимизации расхода топлива на заданном временном интервале, то следует считать эту величину заранее неизвестной. На приведенном ниже примере покажем, как решается эта задача. На рис. 7 приведен суточный профиль мощности нагрузки 1, перестроенный по её продолжительности, график 2. Для упрощения расчетов каждая ступень профиля мощности нагрузки имеет одинаковую длительность – 4 часа.

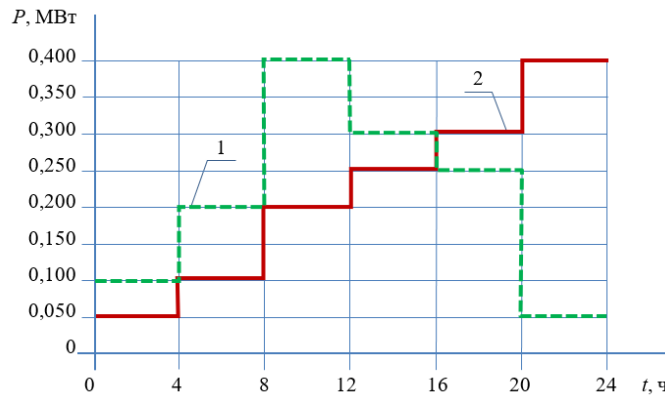


Рис. 7. Суточные профили мощности нагрузки:

1 – исходный профиль мощности нагрузки;

2 – профиль мощности нагрузки по её продолжительности

Fig 7. Daily load capacity profiles:

1– initial load power profile; 2– load power profile by its duration

Положим вначале продолжительность разряда НЭ минимальной: $T_{\max} = 4$ ч (интервал от 20 ч до 24 ч). Тогда во втором уравнении системы (18) верхнее значение индекса j равно 1

$$P_g = \frac{\sum_{j=1}^1 P_{Lj} \Delta t_j}{T_{\max}} - \eta^2 P_C \frac{T_C}{T_{\max}} = \frac{0,4 \cdot 4}{4} - 0,9 \cdot \frac{20}{4} \cdot P_C = 0,4 - 4,5 \cdot P_C \quad (28)$$

Суточный расход топлива Q_4 рассчитывается по формуле

$$Q_4 = 535,4 + 1474,28 \cdot \left[(0,05 + P_C)^{1,45} + (0,1 + P_C)^{1,45} + (0,2 + P_C)^{1,45} + (0,25 + P_C)^{1,45} + (0,3 + P_C)^{1,45} + (0,4 - 4,5 \cdot P_C)^{1,45} \right] \quad (29)$$

На рис. 8 построены расходные характеристики топлива, рассчитанные при $T_{\max} = 4$ ч, а также при $T_{\max} = 8$ ч и $T_{\max} = 12$ ч (последовательное увеличение продолжительности разряда НЭ, соответствующее интервалам часов [16; 24] и [12; 24] на графике 2, рис. 7).

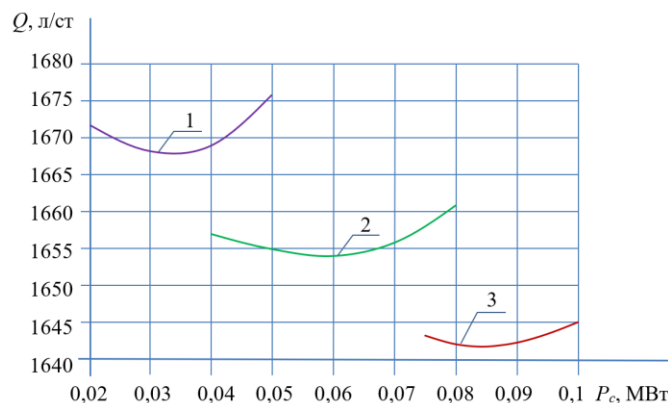


Рис. 8. Расход топлива энергоустановки при увеличении продолжительности разряда НЭ: 1 – $T_{\max} = 4$ ч; 2 – $T_{\max} = 8$ ч; 3 – $T_{\max} = 12$ ч

Fig 8. Fuel consumption of the power plant with an increase in the duration of the NE discharge: 1 – $T_{\max} = 4$ h; 2 – $T_{\max} = 8$ h; 3 – $T_{\max} = 12$ h

Очевидно, рис. 8, что минимальный расход топлива соответствует третьему варианту, когда $T_{\max} = 12$ ч. Дальнейшее увеличение $T_{\max}$ приводит опять к росту расхода топлива.

На рис. 9 приведены суточные профили мощности нагрузки и генерации для оптимального варианта.

Зарядная мощность равна 82 кВт, и поскольку ток заряда 0,2С, то номинальная мощность НЭ должна быть порядка 410 кВт, а энергоемкость – порядка 1000 кВт*ч.

Таким образом, не решая напрямую нелинейную дискретную задачу, можно путем простой алгоритмизацией численных расчетов найти оптимальный вариант величины и длительности разряда НЭ, приводящий к максимальной экономии топлива.

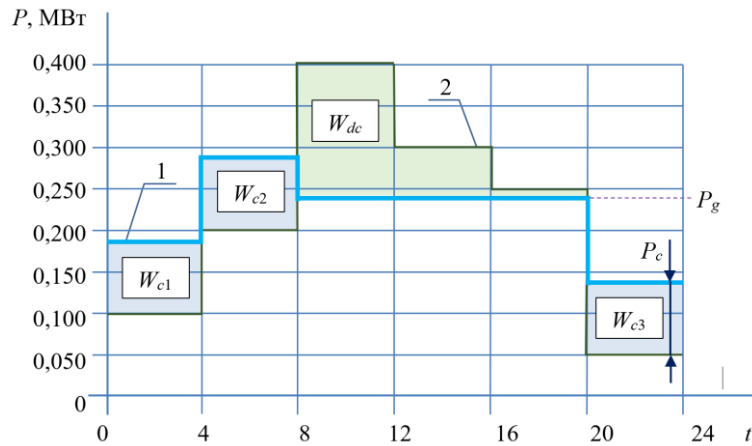


Рис. 9. Суточные профили мощности при $T_{\max} = 12$ ч
1 – профиль генерируемой мощности; 2 – профиль мощности нагрузки
Fig.9 Daily Power capacity profiles by $T_{\max} = 12$ h
1-generated power profile; 2 – load power profile

Закключение

В общем виде рассмотренная выше методика выглядит следующим образом. Записываются выражения баланса мощности в режимах заряда и разряда НЭ на основе получасового суточного профиля нагрузки. Далее они используются при вычислении суточного расхода топлива по известной расходной характеристике энергоустановки. На первом шаге задается минимально приемлемая длительность разряда НЭ в соответствии с имеющимся профилем мощности нагрузки. Далее путем вариации мощности заряда НЭ находится точка минимального расхода топлива на заданном интервале времени. Следующий шаг заключается в увеличении продолжительности разряда в соответствии профилем мощности, ранжированной по её продолжительности, и т.д. Такой простой метод перебора вариантов легко программируется и основан на простых вычислениях. В первую очередь удобство его применения обуславливается дискретным видом исходной информации – получасовыми профилями мощности нагрузки. Вариации суточных профилей мощности должны быть учтены либо настройкой НЭ на некоторый усредненный график (жесткая фиксация продолжительности разряда), либо использованием различных сценариев управления (рабочие/выходные дни), либо применением адаптивной самообучающейся системы регулирования накопителем энергии.

В условиях северного завоза жидкого топлива на удаленные от централизованного электроснабжения территории, когда его стоимость многократно возрастает, актуальны энергосберегающие технологии. Использование нефтяного попутного газа обуславливает существенные затраты на системы его предварительной очистки перед сжиганием в газотурбинных или газопоршневых двигателях. И в этих случаях уменьшение его расхода позволяет в целом снизить стоимость произведенного киловатт-часа электроэнергии. Поскольку для газопоршневых энергоустановок в автономных системах электроснабжения применения НЭ технически необходимо для компенсации влияния набросов/сбросов нагрузки на качество электроэнергии, увеличение их энергоемкости в целях экономии топлива экономически вполне оправдано.

Литература

1. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю и др. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // Энергетическая политика. 2020. № 6. С. 76-87.

2. Российский национальный комитет СИГРЭ. Мониторинг событий, оказывающих существенное влияние на функционирование и развитие мировых энергосистем (еженедельный обзор) [Электронный ресурс] Доступно по: www.cigre.ru/ (Ссылка активна на: январь 2020- январь 2021 гг).

3. Мельников В.Д., Зырянов В.М., Нестеренко Г.Б. Системы накопления электрической энергии для повышения технических и экономических характеристик газопоршневых электростанций // Энергоэксперт. 2020. №3. С. 40-43.

4. Распределенная энергетика в России: потенциал развития [Электронный ресурс] / Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. 2018. Доступно по: URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DE R-3.0_2018.02.01.pdf. Ссылка активна на: сентябрь 2020.

5. Андронов М. Распределенная генерация: будущее энергетики или тупик [Электронный ресурс] / М. Андронов // Деловой журнал Инвест–Форсайт. 2018. Доступно по URL: <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki>. Ссылка активна на: декабрь 2018.

6. Накопители в электроэнергетике [Электронный ресурс] // Энергетический бюллетень / Аналитический центр при Правительстве российской Федерации. – Выпуск № 60, 2018. Доступно по URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/16882.pdf>. Ссылка активна на сентябрь 2019.

7. Газовая электростанция в комбинации с накопителем энергии. [Электронный ресурс]. 2017. Доступно по URL: <http://renen.ru/gas-power-plant-in-combination-with-an-energy-storage-unit/> Ссылка активна на: декабрь 2019.

8. Гладков Д.С., Зырянов В.М. Снижение установленной мощности дизельных генераторов с помощью накопителей энергии / Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. в 9 ч. / под ред. Гадюкиной А.В. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 4. С. 16-20.

9. Bakhteev K., Fedotov A, Misbakhov R. The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages // Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 347-352.

10. Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R., et al. Influence of voltage dips on the stability of excitation of synchronous machines // Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 330-335.

11. Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R. The Improving quality of power supply to industrial consumers using high-power energy storage // 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga. 2018, pp. 1-5.

12. Попутный нефтяной газ: переработка и использование или утилизация [Электронный ресурс] // Пронедра.Ру. 2020. Доступно по URL: <https://pronedra.ru/gas/2017/03/03/pererabotka-poputnogo-neftyanogo-gaza/> Ссылка активна на сентябрь 2020.

13. Бачурин П.А., Гладков Д.С., Зырянов В.М. и др. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы / Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2, март-апрель. С. 18-24.

14. Бахтеев К.Р. Создание гибридного накопителя электроэнергии большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения промышленных потребителей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 3-4. С. 36-44.

15. Аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ) [Электронный ресурс]. 2019. Доступно по URL: <http://wiki2.gridology.ru> Ссылка активна на июль 2019.

16. Фрэн Хоффард. Правильная эксплуатация может продлить жизнь литий-ионного аккумулятора. Доступно по http://powerelectronics.com/portable_power_management/battery_charger_ics/804PET22_li-ion-battery-life.pdf.

17. Аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ). Системы накопления энергии (СНЭ) [Электронный ресурс]. 2020. Доступно по URL: <http://perepad.net/abbm-for-energo>. Ссылка активна на июнь 2020.

18. Кузнецова Н.Д., Митрофанов С.В. Анализ эффективности применения различных типов аккумуляторных батарей в автономных системах электроснабжения / Вестник ПНИПУ: Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 25. С. 48-56.

19. Рынок литий-ионных накопителей энергии будет расти на 55% в год до 2022 г [Электронный ресурс]. 2018. Доступно по URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/rynok-litij-ionnyh-nakopitelej-energii-budet-rasti-na-55-v-god-do-2022-g.html>. Ссылка активна на сентябрь 2020.

20. The Battery Revolution is About to Begin [Электронный ресурс]. 2018. Доступно по URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/krupnyj-nakopitel-energii-na-osnove-svintsovo-uglerodnyh-akkumulyatorov.html> Ссылка активна на сентябрь 2020.

21. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices [Электронный ресурс]. – 2019. Доступно по URL: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices> Ссылка активна сентябрь 2020.

22. ООО «Системы накопления энергии». Официальный сайт компании: <https://estorsys.ru>.

23. IEC Energy. Официальный сайт компании: <https://iec-energy.ru>.

24. Fedotov A., Vagapov G., Abdullazyanov R., et al. Rated power determination for autonomous micro combined heat and power and rechargeable battery system // Latvian journal of physics and technical sciences. 2020. № 6. Riga. P. 12-22.

25. Fedotov A., Misbakhov R., Bakhteev K and Rustem Abdullazyanov. Economic Assessment Of The Efficiency Of The Application Of Energy Storage System To Compensate The Load Rise And Shedding Of Gas Piston Installation / 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). RTUCON 2020 5–6 Nov., Riga, Latvia & Tallinn, Estonia. 7 p.

26. Bakhteev K., Fedotov A., Chernova N. Methodological Approaches to the Choice of Energy Storage and Optimization of Their Parameters to Improve the Electric Power Quality in Various Types of Electric Power Systems // Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2019. Stará Lesná. Slovak Republic. 2019. P. 488-493.

27. ООО «Лиотех». Официальный сайт компании: <https://www.liotech.ru>.

Авторы публикации

Федотов Александр Иванович – докт. техн. наук, проф., профессор кафедры электрических станций им. В.К. Шибанова, Казанский государственный энергетический университет.

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доц., доцент кафедры электрических станций им. В.К. Шибанова, Казанский государственный энергетический университет.

Абдуллазянов Айнура Фоатович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ).

References

1. Zyryanov VM, Kiryanova NG, Korotkov IYu., et al. Energy storage systems: Russian and foreign experience. *Energy Policy*. 2020;6:76-87.

2. Russian National Committee CIGRE. *Monitoring of events that have a significant impact on the functioning and development of world energy systems (weekly review)* [Electronic resource]: Available at: www.cigre.ru/ Accessed to: January 2020 - January 2021.

3. Melnikov VD, Zyryanov VM, Nesterenko GB. Electric energy storage systems to improve the technical and economic characteristics of gas piston power plants. *Energexpert*. 2020;3:40-43.

4. *Distributed energy in Russia: development potential* [Electronic resource] / Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO 2018. Available at: URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf. Accessed to: September 2020.

5. Andronov M. Distributed generation: the future of power engineering or a dead end [Electronic resource]. *Business journal Invest-Foresight*. 2018. Available at: URL: <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki>. Accessed to: December 2018.

6. Storage units in the power industry «Electronic resource». *Energy Bulletin. Analytical Center under the Government of the Russian Federation*. Issue No. 60, 2018. Available at: URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/16882.pdf>. Accessed to: September 2019.

7. *Gas power plant in combination with energy storage*. [Electronic resource]. 2017. Available at: URL: <http://renen.ru/gas-power-plant-in-combination-with-an-energy-storage-unit/>. Accessed to: December 2019.
8. Gladkov DS, Zyryanov VM. Reducing the installed capacity of diesel generators using energy storage. *Science. Technologies. Innovations: Sat. scientific. tr.* at 9 o'clock. Novosibirsk: Publishing house of NSTU. 2018;4:16-20.
9. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages*. Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 347-352.
10. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *Influence of voltage dips on the stability of excitation of synchronous machines*. Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019. pp. 330-335.
11. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *The Improving quality of power supply to industrial consumers using high-power energy storage*. 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga. 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/RTUCON.2018.8659834.
12. Associated petroleum gas: processing and use or utilization «Electronic resource» Pronedra.Ru. 2020. Available at: URL: <https://pronedra.ru/gas/2017/03/03/pererabotka-poputnogo-neftyanogo-gaza/>. Accessed to: September 2020.
13. Bachurin PA, Gladkov DS, Zyryanov VM, et al. Tests of an industrial design of the SNE-10-1200-400 energy storage system in conjunction with the GPU as part of an experimental power system. *Electricity. Transmission and distribution*. 2020;2:18-24.
14. Bakhteev KR. Creation of a hybrid high-power electric energy storage device to prevent short-term power supply disruptions to industrial consumers. *Izvestiya vysshikh educational institutions. Energy problems*. 2018;3-4:36-44.
15. *Rechargeable batteries of high power (ABBM)* «Electronic resource». 2019. Available at: URL: <http://wiki2.gridology.ru>. Accessed to: July 2019.
16. Fran Hoffard. *Correct use can prolong the life of the lithium-ion battery*. http://powerelectronics.com/portable_power_management/battery_charger_ics/804PET22_li-ion-battery-life.pdf
17. Large capacity storage batteries (ABBM). *Energy storage systems (SNE)* «Electronic resource». 2020. Available at: URL: <http://perepada.net/abbm-for-energo>. Accessed to: June 2020.
18. Kuznetsova ND, Mitrofanov SV. Analysis of the effectiveness of using different types of storage batteries in autonomous power supply systems. *Bulletin PNRPU: Electrical engineering, information technology, control systems*. 2018;25:48-56.
19. *The market for lithium-ion energy storage will grow by 55% per year until 2022* [Electronic resource]. 2018. Available at: URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/rynok-litij-ionnyh-nakopitelej-energii-budet-rasti-na-55-v-god-do-2022-g.html>. Accessed to: September 2020.
20. *The Battery Revolution is About to Begin*. 2018. Available at: URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/krupnyj-nakopitel-energii-na-osnove-svintsovo-uglerodnyh-akkumulyatorov.html>. Accessed to: September 2020.
21. *A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices* [Электронный ресурс]. – 2019. Available at: URL: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices>. Accessed to: September 2020.
22. *Energy Storage Systems LLC*. Official site of the company: <https://estorsys.ru>.
23. *IEC Energy*. Official site of the company: <https://iec-energy.ru>.
24. Fedotov A, Vagapov G, Grackova L and Abdullazyanov R. Rated power determination for autonomous micro combined heat and power and rechargeable battery system. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2020;6:12-22.
25. Fedotov A, Misbakhov R, Bakhteev K and Abdullazyanov R. Economic Assessment Of The Efficiency Of The Application Of Energy Storage System To Compensate The Load Rise And Shedding Of Gas Piston Installation / 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). RTUCON 2020 5-6 Nov., Riga, Latvia & Tallinn, Estonia. 7 p.
26. Bakhteev K, Fedotov A, Chernova N. Methodological Approaches to the Choice of Energy Storage and Optimization of Their Parameters to Improve the Electric Power Quality in Various Types of Electric Power Systems. *Proceedings of the 10th International Scientific*

Authors of the publication

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Evgeny A. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ainur F. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

26 февраля 2021г.

Отредактировано

03 марта 2021г.

Принято

04 марта 2021г.



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЦИКЛОМ

Ахмед З.¹, Абасс, Д.А. Павлюченко², В.М. Лесс³

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0003-1836-3435>, theking.amir@mail.ru

ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, pavlyuchenko@corp.nstu.ru

ORCID³: <https://orcid.org/0000-0001-1820-2527>, lessv134@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Для создания гибридной электростанции, работающей от солнечных коллекторов и газотурбинной установки (ISCC), должны быть доступны несколько важных элементов. Для принятия принципиального решения о строительстве гибридной электростанции и определения ее оптимального места расположения требуется анализ множества факторов в Ираке. Ирак – это регион, богатый солнечной энергией. Солнечный энергетический потенциал с площади в 437072 км² превосходит нынешнюю потребность в электроэнергии в сотни тысяч раз. Это поможет Ираку остаться экспортером энергии в будущем, сменив ископаемое топливо на солнечную энергию. МЕТОДЫ. Был рассчитан рейтинг и произведено сравнение провинций Ирака для определения наилучшего региона для размещения подобных гибридных станций с комбинированным циклом. Это обуславливает актуальность исследований в данной области, а именно разработки многофакторной математической модели поиска оптимального расположения ISCC с использованием метода парных сравнений с помощью программы MATLAB. Эльбасра характеризуется как существенно большим уровнем электропотребления региона, так и более развитой инфраструктурой. Это, в целом, и предопределяет наибольший итоговый рейтинг среди всех провинций Ирака как оптимальный регион для использования предложенной математической модели. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Данная математическая модель может использоваться при дальнейшей локализации решения задачи, например при рассмотрении наилучших условий для строительства гибридной электростанции уже в пределах провинции и т.д.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, гибридная электростанция, метод парных сравнений, рейтинг.

Для цитирования: Ахмед З. Абасс, Павлюченко Д.А., Лесс В.М. Математическая модель оптимального размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 18-32. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32.

MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL PLACEMENT OF A HYBRID POWER PLANT WITH A COMBINED CYCLE

Ahmed Z. Abass¹, D.A Pavlyuchenko², V.M. Less³

^{1,2,3}Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0003-1836-3435>, theking.amir@mail.ru

ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, pavlyuchenko@corp.nstu.ru

ORCID³: <https://orcid.org/0000-0001-1820-2527>, lessv134@gmail.com

Abstract: PURPOSE. Purpose of the Work - To build a hybrid solar power plant and a gas turbine plant (ISCC), several important elements must be available. Making a decision in principle to build a hybrid power plant and determining its optimal location requires an analysis of many factors in Iraq. Iraq is a region rich in solar energy. Solar energy potential from an area of 437,072 km² exceeds the current demand for electricity by hundreds of thousands of times. This will help Iraq to remain an energy exporter in the future by switching from fossil fuels to solar energy. METHOD- Determines the relevance of research in this area, namely the development of

a multivariate mathematical model for finding the optimal location of a ISCC using the method of paired comparisons using the MATLAB program. RESULTS - Province Albasra is characterized by a significantly higher level of electricity consumption in the region, as well as a more developed infrastructure. This, in general, predetermines the highest final rating among all the provinces of Iraq as the optimal region for the location of a ISCC. CONCLUSION- Using the proposed mathematical model, a rating was calculated and a comparison was made of the provinces of Iraq to determine the best region for placing such ISCC. This mathematical model can be used for further localization of the solution to the problem, for example, when considering the best conditions for the construction of a hybrid power plant already within a province, etc.

Keywords: renewable energy sources, solar energy, hybrid power plant, paired comparison method, rating.

For citation: Ahmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A, Less V.M. Mathematical model of optimal placement of a hybrid power plant with a combined cycle. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):18-32. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32.

Введение

Обеспечение электроэнергией населения и промышленности было одной из основных проблем Ирака еще с 1990-х годов. Перерывы в электроснабжении тормозят повседневную общественную жизнь, наносят существенный урон в сфере здравоохранения, тем самым заставляя граждан искать альтернативные способы энергоснабжения, например такие, как портативные генераторы, которых в стране насчитывается уже около 4-х миллионов. Чрезмерное использование генераторов вредит окружающей среде (посредством выброса загрязняющих атмосферу газов), экономике; заставляет иракцев приобретать большое количество ископаемого топлива, что вредит общему благосостоянию населения страны и ведет к истощению природных ресурсов. Одним из основных и наиболее перспективных глобальных трендов является инвестиция в возобновляемую энергетику, в частности солнечную [1-5]. Республика Ирак расположена на юго-западе Азии и на северо-востоке от Лиги Арабских Государств. На севере Ирак граничит с Турцией, на востоке с Ираном, на западе с Сирией, Иорданом и Саудовской Аравией, на юге с Кувейтом и Саудовской Аравией. Ирак расположен между 29-37 градусами северной широты и 38-48 градусами восточной долготы, площадь страны составляет 437072 км². Север страны занят гористой местностью с меньшим количеством солнечных дней, чем в других регионах страны, особенно зимой. Срединная часть страны представлена равниной между двух главных рек: Тигром и Евфратом, получающая намного больше солнечного света, чем северные области страны. Южная часть страны представляет собой территорию, где воздух чист от загрязнений, если не брать в расчет пылевые бури. Эта область считается одним из регионов с максимальной энергетической освещенностью, что обусловлено удачным географическим расположением страны на Ближнем Востоке, на северо-востоке Аравийского полуострова [6-8]. Климат Ирака преимущественно жаркий, с температурами, достигающими 56 °C с начала мая по конец сентября, и сухой – осадки выпадают в очень малом количестве, однако в южной прибрежной провинции Басра климат достаточно влажен. Несмотря на благоприятный климат с высокими средними температурами воздуха и высоким уровнем солнечного излучения, сопутствующая запыленность, или наоборот, чрезмерная влажность воздуха, может затруднить эффективное использование и применение фотоэлектрических систем. Пустынные области Ирака, особенно рядом с Руб-эль-Хали, имеют особенно высокий уровень солнечного излучения [9-11]. В общем и целом, вся территория Ирака может считаться пригодной для размещения солнечных электростанций. Потенциал солнечной энергии на территории Ирака примерно соответствует показателям стран «Солнечного Пояса», в которых он один из самых высоких в мире. В соответствии с исследованиями ученых из Ирака теоретически возможно не только обеспечить страны энергией, но и экспортировать ее в значительных количествах [12]. Ирак имеет большой потенциал солнечной энергии: от 1800 до 2390 кВт·ч/м²/год. Как видно на рис. 1, большая часть территории страны пригодна для постройки солнечных электростанций.

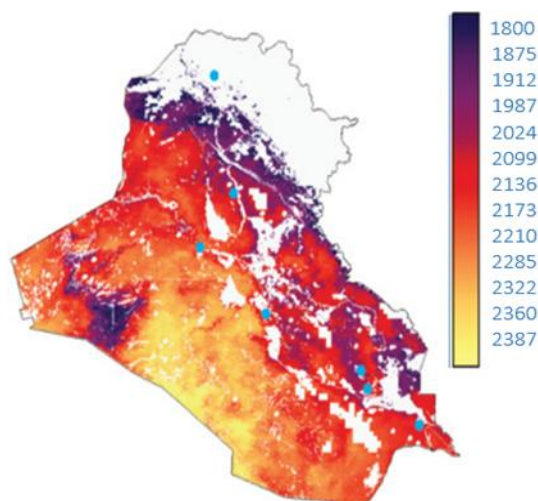


Рис. 1. Среднегодовая солнечная радиация в Ираке, кВт·ч/м²/год
Fig.1 Average annual solar radiation in Iraq kWh/m² / year

Среднее дневное количество солнечной радиации на всей территории Ирака составляет 6,5-7 кВт·ч/м². Вышеприведенные данные дают основание использовать солнечную энергию для производства электроэнергии [13]. Существующий дефицит требует форсировать поиски других схем генерации с более высокой эффективностью, более низкой себестоимостью кВтч и Гкал, более коротким временем монтажа и ввода в эксплуатацию оборудования, а также с более чистыми источниками энергии. Для того чтобы дать Иракскому электроэнергетическому сектору реальный толчок и догнать растущий спрос, предлагается включить в парогазовый цикл существующих газотурбинных электростанций энергию солнца от солнечных коллекторов.

Исследования авторов [11,18] показывают, что дополнение парогазового цикла солнечной энергией позволяет существенно увеличить общий коэффициент полезного действия электростанции. Также основными преимуществами предлагаемой гибридной схемы являются экономия топлива, снижение спроса на электроэнергию в пиковый период, а также сокращение выбросов углерода.

Технология преобразования солнечной энергии на сегодня достаточно хорошо изучена, что снижает риски по модернизации электростанций Ирака. Однако, для принятия принципиального решения о строительстве гибридной газовой/солнечной электростанции и определения ее оптимального места расположения требуется анализ множества факторов, наиболее значимыми из которых являются следующие: солнечное излучение, количество световых часов, размер потребности в электроэнергии, наличие газовой электростанции, пустые пространства. Это обуславливает актуальность исследований в данной области, а именно разработки многофакторной математической модели поиска оптимального расположения гибридной электростанции с комбинированным циклом.

Постановка задачи

Из вышеприведенной информации видно, что энергетические показатели Ирака удовлетворяют условиям строительства солнечных энергетических установок. При этом требуется оценка интенсивности излучения и различных рисков, влияющих на эти установки. Эти риски оцениваются либо по их возникновению, либо по месту в зависимости от характеристик почвы или техногенной деятельности. Среди них землетрясения, оползни, карст, наводнения, загрязнения, зоны низкого давления, набухающие глины, горные разработки, вторжения морской воды и песчаные дюны. По данным Иракского метеорологического управления (IMOAS) самая низкая опасность находится в западной и южной четырехугольной зоне, т.е. в Синджаре, Сур, Вади-аль-Мия, Рутбе, Вади-Хоране, Вади-Тибиле, Аль-Туртаре, Аль-Брите, Аль-Ма'Ания, Аль-Салман, Ансаб и Ал-Рухаймия. В табл. 1 показано изменение годовой солнечной радиации и светового дня в зависимости от региона Ирака [14].

Таблица 1

Координаты, солнечная радиация и световой день для городов Ирака (1990–2019 гг.)

Город	Широта (N) и долгота (E)	Солнечная радиация, МДж/м ² /год	Световой день с октября по март, ч	Световой день с апреля по сентябрь, ч
Эл басра	30°31-47°50	7135,46	10,3-9,5	11,2-13,5
Эл насирия	31°01- 46°15	7263,97	10,2-9,3	11,1-13,3
Эл самава	31°16- 45°15	7123,67	10,3-9,4	11,2-13,5
Эл имара	32°07- 46°44	7021,23	10-9,1	10,9-13
Эл кадисия	31°57 45°00	7021,23	9,9-9,5	10,5-12,8
Эл наджаф	31°57-44°15	7135,20	9,9-9,5	10,5-12,8
Эл хай	32°08-46°05	7030,82	9,5- 8,1	10,1-12,9
Карбала	32°34 -44°03	7185,74	9,9-9,5	10,5-12,8
Эл ротба	33°02- 40°15	7114,44	9,2-8,5	8-12,3
Багдад	33°18- 44°30	6997,46	9,2-8	10-12,6
Мосул	36°19- 43°05	6318,83	7,5-5,8	8,1-12,3
Хадиса	34°08- 41°13	6662,75	7,8-7,4	8,3-11,3
Тикрит	34°35-43°37	6530,00	7,8-7,4	8,3-11,3
Киркук	35°28-44°21	6660,17	6,6-7,8	9,4-11,2
Заху	37°08- 42°50	6835,46	6,1-6	7,4-11

С использованием данных табл. 1 в работе выполнено исследование солнечного энергетического потенциала регионов Ирака, а также разработка математической модели определения оптимального места размещения гибридной электрической станции с комбинированным циклом.

Математическая модель

Современная практика показывает, что основные трудности при выборе и принятии решений обусловлены прежде всего недостаточно высоким качеством и неполнотой информации, имеющейся в распоряжении управляющих органов власти. Как было отмечено, в работе выделены пять факторов, которые известны и могут повлиять на реализацию решения в будущем, но предсказать их точно невозможно: среднегодовой уровень солнечной радиации, среднегодовой световой день, электропотребление, суммарная мощность существующих газовых станций, свободная доступная площадь для размещения солнечных коллекторов. В табл.2. и 3 приведены исходные и нормированные

Таблица 2

Характеристики провинций Ирака. Исходная информация

Провинция	Свободная площадь, км ²	Электропотребление, МВт	Среднегодовая солнечная радиация, кВтч/м ²	Мощность газовых станций, МВт	Среднегодовой световой день, ч
Эльанбар	122000	433	2300	250	10
Вавилон	4000	650	2000	220	10
Эльбасра	17888	2805	2120	3750	11
Дикар	11500	993	2150	500	10,7
Кадисия	7500	515	2150	500	10,4
Дияля	16200	572	1900	740	9,8
Карбала	4100	703	2250	250	10,5
Киркук	7200	672	1850	1174	8,5
Мисан	15000	593	2050	620	10,7
Мутана	50500	403	2300	500	11
Наджаф	27000	673	2280	820	10,4
Мосул	30500	706	1800	0	8,2
Васит	14500	700	1900	125	10,6
Саладин	19700	462	1900	1014	8,6
Сулеймания	10500	2200	1800	1500	7
Эрбил	11000	1700	1800	1500	7
Доход	5000	990	1850	500	7

Характеристики провинций Ирака. Нормированные значения

Провинция	Свободная площадь, о.е.	Электропотребление, о.е.	Среднегодовая солнечная радиация, о.е.	Мощность газовых станций, о.е.	Среднегодовой световой день, о.е.
Эльанбар	0,3261	0,0275	0,0669	0,0179	0,0620
Вавилон	0,0107	0,0412	0,0581	0,0158	0,0620
Эльбасра	0,0478	0,1779	0,0616	0,2686	0,0682
Дикар	0,0307	0,0630	0,0625	0,0358	0,0663
Кадисия	0,0200	0,0327	0,0625	0,0358	0,0644
Дияля	0,0433	0,0363	0,0552	0,0530	0,0607
Карбала	0,0110	0,0446	0,0654	0,0179	0,0651
Киркук	0,0192	0,0426	0,0538	0,0841	0,0527
Мисан	0,0401	0,0376	0,0596	0,0444	0,0663
Мутана	0,1350	0,0256	0,0669	0,0358	0,0682
Наджаф	0,0722	0,0427	0,0663	0,0587	0,0644
Мосул	0,0815	0,0448	0,0523	0,0000	0,0508
Васит	0,0388	0,0444	0,0552	0,0090	0,0657
Саладин	0,0527	0,0293	0,0552	0,0726	0,0533
Сулеймания	0,0281	0,1395	0,0523	0,1074	0,0434
Эрбил	0,0294	0,1078	0,0523	0,1074	0,0434
Доход	0,0134	0,0628	0,0538	0,0358	0,0434
Итого	1	1	1	1	1

Для поиска оптимального места размещения гибридной станции с комбинированным циклом с учетом рассмотренных показателей предложена следующая многофакторная математическая модель:

$$\text{рейтинг} = S_{av} \cdot C_w^S + I_{av} \cdot C_w^I + L_{city} \cdot C_w^L + S_{gas} \cdot C_w^S + A_{free} \cdot C_w^A, \quad (1)$$

где S_{av} – среднегодовой световой день, о.е.; C_w^S – весовой коэффициент для среднегодового светового дня, о.е.; I_{av} – среднегодовая солнечная радиация, о.е.; C_w^I – весовой коэффициент для среднегодовой солнечной радиации, о.е.; L_{city} – электропотребление, о.е.; C_w^L – весовой коэффициент для электропотребления, о.е.; S_{gas} – суммарная мощность существующих газовых станций, о.е.; C_w^S – весовой коэффициент для суммарной мощности существующих газовых станций, о.е.; A_{free} – свободная площадь, о.е.; C_w^A – весовой коэффициент для свободной площади, о.е. Весовые коэффициенты математической модели (1) определяются на основе экспертизы. Для обработки экспертной информации в работе предложено использовать метод парных сравнений [15]. На основе этого метода будут получены весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого фактора. Для экспертизы привлечены шесть экспертов из Ирака (*Northern technical university, Baghdad university, Wassit university, Anbar university*) и России ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»). Экспертам было предложено заполнить анкету методом выставления оценок. Анкетирование выполнено с помощью *Google Forms* (рис. 2-3).

Анкета эксперта

Программное обеспечение *Google Forms* связано с другим онлайн-сервисом – *Google Sheets*. Это сделано для повышения удобства работы с полученной информацией [16]. Результаты анкет, полученные от экспертов, автоматически заносятся в таблицу и отправляются интервьюеру для последующей обработки.

Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

Предлагаем вашему вниманию анкету для получения экспертного заключения. Целью данной экспертизы является получение точных мнений группы экспертов в области инженерии возобновляемых источников энергии, в частности, солнечной энергии. В этой экспертизе рассматриваются пять наиболее важных факторов определения оптимального места размещения проектируемых гибридных (газовые/солнечные) электростанций для определения влияния (значимости) каждого фактора на итоговое решение.

В этой процедуре сравнение всех факторов производится попарно, с тем чтобы в каждой паре установить наиболее важный фактор. Если фактор А более предпочтителен, чем фактор В, то оценка $A=1$, а $B=0$. Следует отметить частный случай, когда, по мнению эксперта, ни один из рассматриваемых факторов в паре не имеет предпочтительности, факторы равнозначны. Тогда оценка для них может быть сформирована следующим образом: $A=B=0,5$.

* **Обязательно**

Рис.2. Анкета эксперта. Вводная часть

Fig.2. Expert questionnaire. Introduction

Электропотребление --- Мощность существующих газовых электростанций *

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1 - первый фактор предпочтительнее второго

Выбрать

Электропотребление --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции *

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1 - первый фактор предпочтительнее второго

Выбрать

Мощность существующих газовых электростанций --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции *

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1 - первый фактор предпочтительнее второго

Выбрать

Отправить

Рис. 3. Анкета эксперта. Пример сравнения факторов

Fig. 3. Expert questionnaire. Example of comparing factors

МЕТОДЫ. Метод парных сравнений (Paired comparison method)

При реализации метода сравнение всех факторов производится попарно, с тем чтобы в каждой паре установить наиболее важный фактор. Если фактор A_i более предпочтителен, чем фактор A_j , то оценка $V_i=1$, а $V_j=0$.

Следует отметить частный случай, когда, по мнению эксперта, ни один из рассматриваемых факторов в паре не имеет предпочтительности, т. е. i -й и j -й фактор равнозначны. Тогда оценка для них может быть сформирована следующим образом: $V_i = V_j = 0,5$.

Результаты сравнения заносятся в матрицу парных сравнений. Пример такой матрицы показан в табл. 4. Матрица является квадратной с незаполненной главной диагональю, так как сравнение фактора с самим собой не имеет смысла. Оценка факторов экспертом осуществляется по горизонтали.

Таблица 4

Оценка факторов экспертом

факторы	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	Сумма
A ₁	-	0,5	1	1	1	3,5
A ₂	0,5	-	1	1	1	3,5
A ₃	0	0	-	0,5	0,5	1
A ₄	0	0	0,5	-	0,5	1
A ₅	0	0	0,5	0,5	-	1

Приведенная в табл. 4 матрица отвечает следующим результатам сравнения:

- фактор A₁ равно предпочтителен A₂, и более предпочтителен, чем A₃, A₄, A₅;
- фактор A₂ равно предпочтителен A₁, и более предпочтителен, чем A₃, A₄, A₅;
- фактор A₃ менее предпочтителен, чем A₁, A₂ и равно предпочтителен A₄, A₅;
- фактор A₄ менее предпочтителен, чем A₁, A₂ и равно предпочтителен A₃, A₅;
- фактор A₅ менее предпочтителен, чем A₁, A₂ и равно предпочтителен A₃, A₄.

Полученные матрицы парных сравнений в результате анкетирования приведены на рис. 4, где A₁-A₅ – это среднегодовой световой день, среднегодовая солнечная радиация, электропотребление, мощность существующих газовых электростанций, свободная площадь для размещения солнечной электростанции соответственно.

Результаты парных сравнений

Продолжить

Эксперт 1

	A1	A2	A3	A4	A5
A1		0.5	1	1	1
A2	0.5		1	1	1
A3	0	0		0.5	0.5
A4	0	0	0.5		0.5
A5	0	0	0.5	0.5	

Эксперт 4

	A1	A2	A3	A4	A5
A1		0.5	1	1	1
A2	0.5		1	1	1
A3	0	0		0.5	0.5
A4	0	0	0.5		0.5
A5	0	0	0.5	0.5	

Эксперт 2

	A1	A2	A3	A4	A5
A1		0.5	1	1	1
A2	0.5		1	1	1
A3	0	0		0.5	0.5
A4	0	0	0.5		0.5
A5	0	0	0.5	0.5	

Эксперт 5

	A1	A2	A3	A4	A5
A1		0	1	1	1
A2	0		1	1	1
A3	0	0		0.5	0.5
A4	0	0	0.5		0.5
A5	0	0	0.5	0.5	

Эксперт 3

	A1	A2	A3	A4	A5
A1		0.5	1	1	1
A2	0.5		1	1	1
A3	0	0		0.5	0.5
A4	0	0	0.5		0.5
A5	0	0	0.5	0.5	

Эксперт 6

	A1	A2	A3	A4	A5
A1		0.5	1	1	1
A2	0.5		1	1	1
A3	0	0		0.5	0.5
A4	0	0	0.5		0.5
A5	0	0	0.5	0.5	

Рис. 4. Результаты парных сравнений

Fig.4. Results of paired comparisons

Оценка согласованности мнений экспертов (Assessing the consistency of expert opinions)

Обработка результатов парных сравнений, а также последующая оценка согласованности мнений экспертов (расчет коэффициентов согласованности и конкордации) выполнены в среде *Matlab* [17].

На основании данных экспертизы был произведен расчет коэффициента согласованности согласно следующему алгоритму

– математическое ожидание оценки i -го фактора

$$M(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{m} \quad (2)$$

где A_{ij} – оценка j -го эксперта по i -му фактору; m – общее количество экспертов; – дисперсия оценки i -го фактора

$$D(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^m (A_{ij} - M(A_i))^2}{m-1} \quad (3)$$

где – среднее квадратическое отклонение оценки i -го фактора

$$\sigma(A_i) = \sqrt{D(A_i)} \quad (4)$$

где – коэффициент согласованности экспертов по i -му фактору

$$\mu(A_i) = 1 - \frac{\sigma(A_i)}{M(A_i)} \quad (5)$$

Алгоритм расчета коэффициента конкордации приведен ниже суммарный ранг i -го фактора

$$R_{i\Sigma} = \sum_{j=1}^m A_{ij} \quad (6)$$

где – математическое ожидание рангов

$$T = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{n}, \quad (7)$$

где n – количества факторов.

– отклонение i -го фактора

$$\Delta_i = R_{i\Sigma} - T \quad (8)$$

– сумма квадратов отклонений

$$S = \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2 \quad (9)$$

– коэффициент конкордации

$$W = \frac{S}{S_{\max}} \quad (10)$$

$$S_{\max} = \frac{1}{12} * m^2 n (n^2 - 1) \quad (11)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Результаты расчета

	A1	A2	A3	A4	A5
M	2.9167	3.1667	1.5000	1.5000	0.9167
D	0.1417	0.3667	0.2000	0.2000	0.0417
Sigma	0.3764	0.6055	0.4472	0.4472	0.2041
Mu	0.8710	0.8088	0.7019	0.7019	0.7773

Суммарный ранг R

	A1	A2	A3	A4	A5
1	17.50	19	9	9	5.50

Средняя сумма рангов: 12

Отклонение от средней суммы

	A1	A2	A3	A4	A5
1	5.50	7	-3	-3	-6.50

Сумма квадратов отклонений: 139.5

Коэффициент конкордации: 0.3875

$\chi^2_{\text{набл}}$: 9.3

Весовые коэффициенты

	A1	A2	A3	A4	A5
1	0.29	0.32	0.15	0.15	0.09

Рис. 5. Оценка согласованности мнений экспертов

Fig.5. Assessment of the consistency of expert opinions

Как видно на рис. 5, коэффициент согласованности всех факторов не меньше общепринятого граничного значения (0,7-0,8), что соответствует согласованному мнению экспертов по всем факторам.

После получения окончательных значений коэффициентов в пределах допустимого диапазона проводятся процедуры, связанные с соответствиями полученных результатов. Проверим полученный коэффициент конкордации на статистическую значимость по критерию χ^2 -Пирсона. Согласно данным рис. 5 наблюдаемое значение критерия χ^2 -Пирсона $\chi^2_{\text{набл}} = 9,3$

Для оценки статистической значимости необходимо и достаточно, чтобы выполнялось следующее условие

$$X^2_{\text{набл}} > X^2_{\text{табл}} \quad (12)$$

где $\chi^2 = f(r, \alpha)$, α – уровень значимости, r – число степеней свободы, равное $n-1$.

Если условие выполняется, значит, полученная величина степени согласованности мнений экспертов будет неслучайным значением. В противном случае экспертиза считается несостоявшейся.

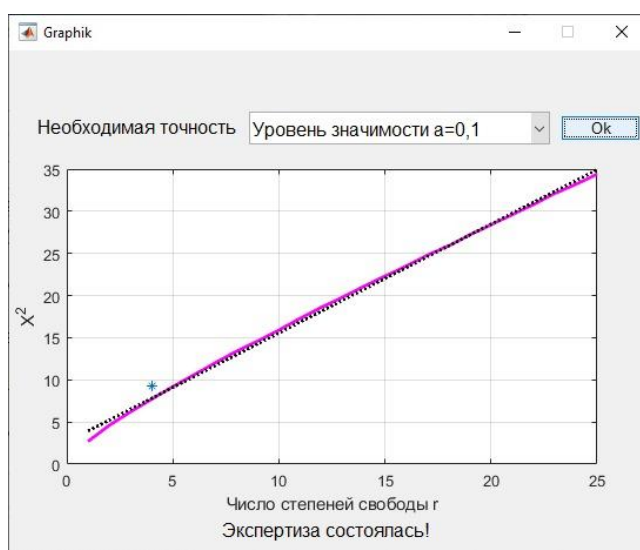


Рис. 6. Проверка по критерию χ^2 -Пирсона
Fig.6. Checking by the χ^2 -Pearson criterion

На рис. 6 приведена зависимость, соответствующая распределению табличного значения $\chi^2_{\text{табл}}$ при уровне значимости $\alpha=0,1$. Как видно, условие выполняется, полученная величина степени согласованности мнений экспертов неслучайное значение, экспертиза считается состоявшейся. По полученным индивидуальным оценкам экспертов можно перейти к групповым оценкам – весовым коэффициентам каждого из рассматриваемых факторов согласно

$$C_w^i = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij}}, \quad (13)$$

Тогда выражение для итогового рейтинга с учетом значимости каждого рассматриваемого фактора окончательно примет следующий вид:

$$\text{рейтинг} = 0,29S_{av} + 0,32I_{av} + 0,15L_{city} + 0,15S_{gas} + 0,09A_{free} \quad (14)$$

Анализ результатов

С использованием математической модели (14) был рассчитан рейтинг и произведено сравнение провинций Ирака для определения наилучшего региона для размещения гибридных станций с комбинированным циклом [19-25]. Результаты сравнения как по отдельным факторам, так и для итогового рейтинга провинций Ирака приведены на рис. 7-12.

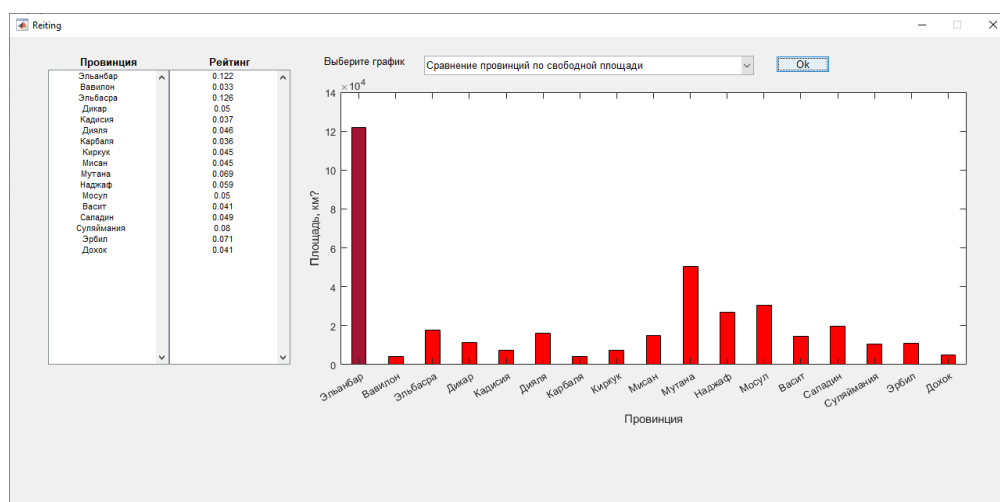


Рис. 7. Сравнение провинций Ирака по свободной площади для размещения солнечной электростанции
Fig.7. Comparison of the provinces of Iraq by available area for the placement of a solar power plant

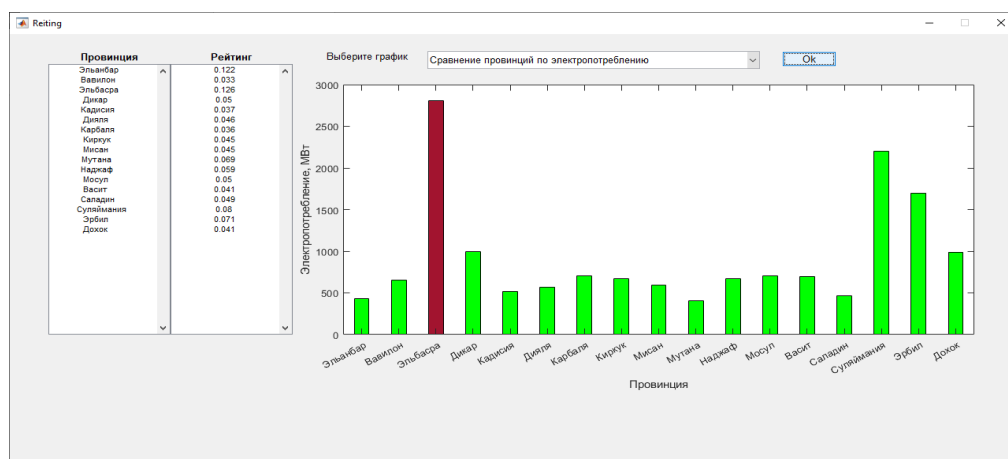


Рис. 8. Сравнение провинций Ирака по уровню электропотребления
Fig.8. Comparison of the provinces of Iraq by the level of electricity consumption

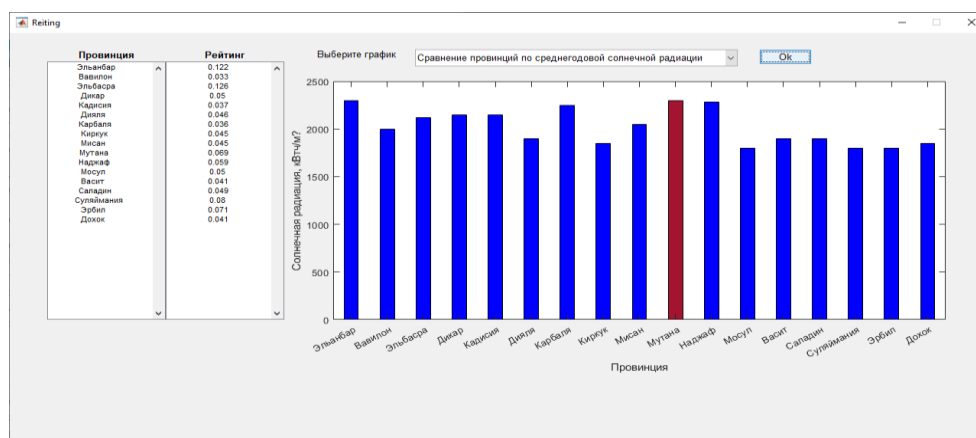


Рис. 9. Сравнение провинций Ирака по уровню среднегодовой солнечной радиации
Fig.9. Comparison of the provinces of Iraq by the level of average annual solar radiation

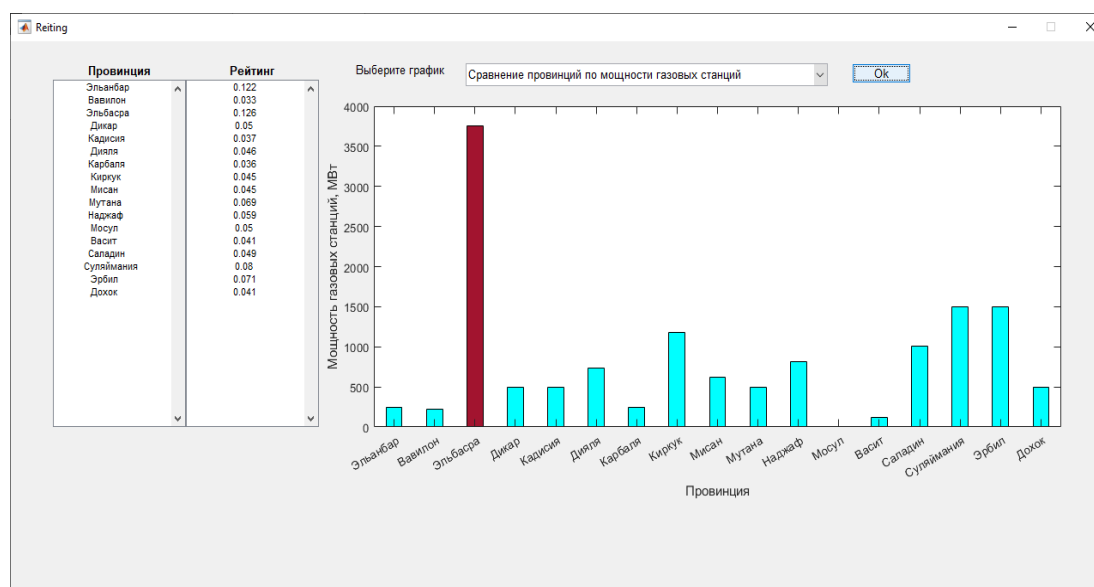


Рис. 10. Сравнение провинций Ирака по мощности существующих газовых станций
 Fig.10. Comparison of Iraq's provinces by capacity of existing gas stations

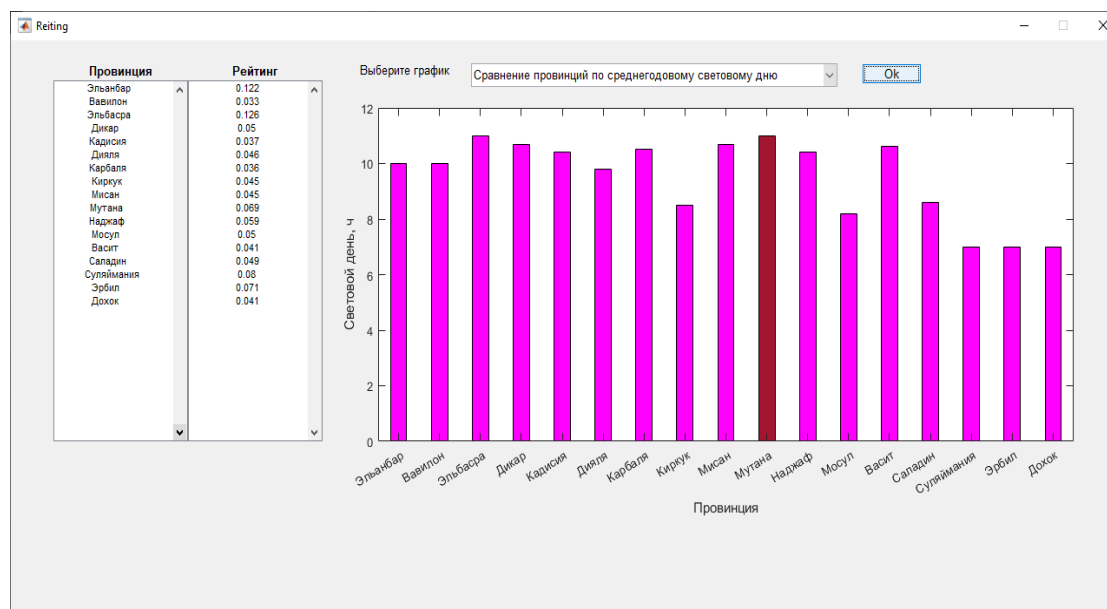


Рис. 11. Сравнение провинций Ирака по продолжительности среднегодового светового дня
 Fig.11. Comparison of Iraq's provinces by average annual daylight hours

Как видно на рис. 7-11, при относительно близких значениях факторов, характеризующих солнечный энергетический потенциал провинций Ирака, Эльбасра характеризуется существенно большим уровнем электропотребления региона, так и более развитой инфраструктурой. Это, в целом, и предопределяет наибольший итоговый рейтинг среди всех провинций Ирака как оптимальный регион для размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом (рис.12).

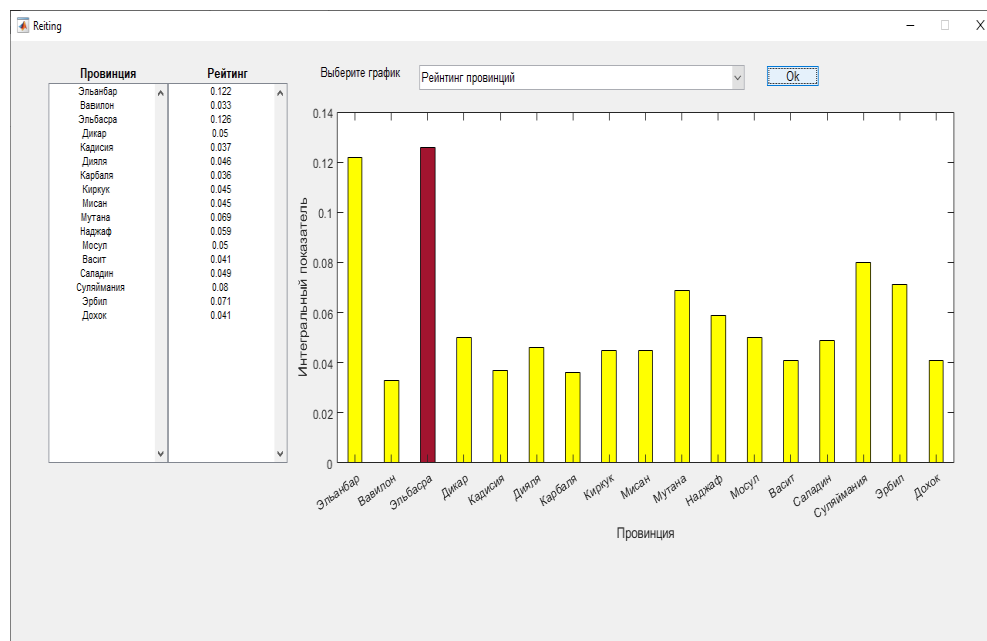


Рис. 12. Итоговый рейтинг провинций Ирака

Fig.12. Final ranking of the provinces of Iraq

Заклучение

Одним из основных перспективных глобальных трендов является инвестиция в возобновляемую энергетику. Солнечный энергетический потенциал Ирака является одним из самых высоких в мире. Авторами предлагается включить в парогазовый цикл существующих газотурбинных электростанций энергию солнца от солнечных коллекторов. Модернизация основных действующих электростанций Ирака с форсированием их мощности выше существующего уровня позволит пересмотреть цены на электроэнергию и преобразовать электроэнергетический сектор в самокупаемую отрасль [26-30]. С использованием предложенной математической модели был рассчитан рейтинг и произведено сравнение провинций Ирака для определения наилучшего региона для размещения подобных гибридных станций с комбинированным циклом.

Данная математическая модель может использоваться при дальнейшей локализации решения задачи, например при рассмотрении наилучших условий для строительства гибридной электростанции уже в пределах провинции и т.д.

Литература

1. Abass Ahmed. Z., Pavlyuchenko D.A. The exploitation of western and southern deserts in Iraq for the production of solar energy. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 2019. V. 9. No. 6. pp. 4617-4624.
2. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. Available at URL: <https://power.larc.nasa.gov>.
3. Эльмохлави А.Э., Очков В.Ф., Казанджан Б.И. оценка производительности и энергоэффективности интегрированного солнечного комбинированного цикла электростанции. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(1-2):43-54.
4. Nezammahalleh H., Farhadi F., Tanhaemami M. Conceptual design and techno-economic assessment of integrated solar combined cycle system with DSG technology. Solar energy. 2010. V.84(9). pp. 1696-1705.
5. Zachary J. Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) Systems. Combined Cycle Systems for Near-zero Emission Power Generation; Book; Woodhead Publishing Series in Energy. 2012. № 32. pp. 283-305.
6. Baghernejad A., Yaghoubi M. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. Energy Conversion and Management. 2011. 52 (5). pp. 2193-2203.
7. Dersch J. Trough integration into power plants-a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems. Energy. 2004. 29 (5-6). pp. 947-959.

8. Burgermeister J. Iraq looks to solar energy to help rebuild its economy URL: Available at: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/03/iraq-looks-to-solar-energy-to-help-rebuild-itseconomy>. Accessed: 12 February 2020
9. Al-Waeely A. A., Salman S. D., Abdol-Reza W. K., et al. Evaluation of the spatial distribution of shared electrical generators and their environmental effects at Al-Sader City-Baghdad-Iraq. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*. 2014. V. 14. N. 2. pp. 16-23.
10. Меламед Л.Э. Метод встроенных решений в моделировании турбулентности. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020;22(5):28-40.
11. Abass Ahmed. Z., Pavlyuchenko D.A. Southern Iraq gas station conversation to integrated solar combined cycle,” in *E3S web conferences* 114 ,05008 (2019)
12. Abass Ahmed. Z., Pavlyuchenko D.A. Turning Iraq into a country of energy exporter through the exploitation of solar energy and vast desert land,” in *E3S web conferences* 114 ,05008 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405008>.
13. Iraq, The Iraqi Ministry of Electricity, <https://moelc.gov.iq/> .
14. Ministry of transportation, Iraqi meteorological organization and seismology <http://meteoseism.gov.iq/> .
15. Секретарев Ю.А., Панова Я.В. Выбор и принятие Решений в электроэнергетике. Новосибирск, 2018.
16. Google workspace https://workspace.google.com/intl/en_ie/.
17. Math work, program MATLAB <https://www.mathworks.com/downloads/> .
18. Абасс А.З., Павлюченко Д.А., Балабанов А.М., и др. Включение в парогазовый цикл газотурбинных электростанций ирака солнечной энергии как способ решения дефицита мощности энергосистемы страны. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020;22(2):98-107.
19. Ahmed Z. Abass., Pavlyuchenko D.A., Kobobel I.V. Solar energy perspectives in Iraq, *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020 (45). pp 63-70.
20. Hasan F. Khazaal., Haider Th. Salim Alrikabi., Faisal Theyab Abed. Water desalination and purification using desalination units powered by solar panels. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. V. 7, N 3.
21. Ahmed Zkear Abass., Pavlyuchenko D.A., Zozan Saadallah Hussain. Survey about impact voltage instability and transient stability for a power system with an integrated solar combined cycle plant in Iraq by using ETAP. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2021. V 2, No 3.
22. Abass A.Z.; Pavlyuchenko D.A.; Zozan Saadallah Hussain. Methods Comparison for Optimal Capacitor Placement in Distribution System. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 6-9 Oct. 2020,
23. Павлюченко Д.А., Любченко В.Я. Рейтинговая оценка показателей энергоэффективности на основе метода анализа иерархий // *Новое в Российской электроэнергетике*. 2017. №11. С. 77-91.
24. Reda M., Saied N., Khaldi A., et al. Iraq electrical power infrastructure - past, present and future developments and expectations. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition; Atlanta, GA; 2006*. pp. 1792-1795.
25. Alibage A. Assessing photovoltaic solar technologies as a solution for the problem of power shortage in Iraq. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET); Honolulu, HI; 2018*. pp. 1-16.
26. Khalidah A J Al-Qayim Integrated solar thermal combined cycle for power generation in Iraq *Materials Science and Engineering*, V. 518, Electric and Electronic Engineering; Published under licence by IOP Publishing Ltd.
27. Boumedjirek M., Merabet A., Feidt M., et al. Performance evaluation of parabolic trough power plants on direct steam generation and integrated solar combined cycle system in Algeria. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Tangier; 2017*. pp. 1-8.
28. Talukder P, Soori PK. Integration of parabolic trough collectors with natural gas Combined Cycle power plants in United Arab Emirates. *International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE); Offenburg. 2015*. pp. 62-69.
29. Li C.-JIOЮ., Li P., Wang K., et al. Survey of properties of key single and mixture halide salts for potential application as high temperature heat transfer fluids for concentrated solar thermal power systems. *AIMS Energy* 2(2). 2014. pp. 133-157. doi: 10.3934/energy.2014.2.133.

30. Amani M., Ghenaiet A., Smaili A. Determination of the performance of a solar tower integrated with a Combined Cycle. 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Rabat, Morocco. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/IRSEC.2018.8703000.

Авторы публикации

Ахмед Зкеар Абасс – аспирант, Новосибирский государственный технический университет. (НГТУ).

Дмитрий Анатольевич Павлюченко – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. (НГТУ).

Виталий Максимович Лесс – студент, Новосибирский государственный технический университет. (НГТУ).

References

1. Abass Ahmed. Z, Pavlyuchenko DA. The exploitation of western and southern deserts in Iraq for the production of solar energy. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 2019;9(6):4617-4624. doi: 10.11591/ijece.v9i6.pp4617-4624.
2. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources URL: <https://power.larc.nasa.gov/>.
3. Elmohlawy AE, Ochkov VF, Kazandzhan BI. Evaluation of the performance and energy efficiency of integrated solar combined cycle power plant. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(1-2):43-54. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-43-54>
4. Nezammahalleh H, Farhadi F, Tanhaemami M. Conceptual design and techno-economic assessment of integrated solar combined cycle system with DSG technology. *Solar energy*. 2010;84(9):1696-1705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.05.007>.
5. Zachary J. Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) Systems. *Combined Cycle Systems for Near-zero Emission Power Generation*. Book; Woodhead Publishing Series in Energy. 2012;32:283-305. doi: 10.1016/B978-0-85709-013-3.50010-9.
6. Baghernejad A, Yaghoubi M. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2011. 52 (5). pp. 2193-2203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.019>
7. Dersch J. Trough integration into power plants-a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems. *Energy*. 2004;29(5-6):947-959. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(05\)80188-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(05)80188-2)
8. Burgermeister J. Iraq looks to solar energy to help rebuild its economy. Available at: URL: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/03/iraq-looks-to-solar-energy-to-help-rebuild-itseconomy>. Accessed: 12 February 2020
9. Al-Waeely AA, Salman SD, Abdol-Reza WK, et al. Evaluation of the spatial distribution of shared electrical generators and their environmental effects at Al-Sader City-Baghdad-Iraq. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*. 2014;14(2):16-23. doi: 10.24842/1611/0022.
10. Melamed LE. Built-in turbulence modelling solution method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(5):28-40. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-28-40>
11. Abass Ahmed. Z, Pavlyuchenko DA. Southern Iraq gas station conversion to integrated solar combined cycle in *E3S web conferences* 114 ,05008 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405008>.
12. Abass Ahmed. Z, Pavlyuchenko DA. Turning Iraq into a country of energy exporter through the exploitation of solar energy and vast desert land in *E3S web conferences* 114 ,05008 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405008>.
13. Iraq. The Iraqi Ministry of Electricity, <https://moelc.gov.iq/>.
14. Ministry of transportation, Iraqi meteorological organization and seismology <http://meteoseism.gov.iq/>.
15. Sekretarev YuA, Panova YaV. *Choice and decision-making in the electric power industry*.
16. Google workspace https://workspace.google.com/intl/en_ie/.

17. *Math work*, program MATLAB <https://www.mathworks.com/downloads/>.
18. Ahmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A, Balabanov A.M, VM. Less. Inclusion of solar energy in Iraq gas-turbine power plants as a method of solving the country's energy system shortage. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):98-107. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-98-107.
19. Ahmed Z. Abass, D.A Pavlyuchenko, Kobobel I. Solar energy perspectives in Iraq, *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020 (45);63-70.
20. Hasan F. Khazaal, Haider Th. Salim Alrikabi, Faisal Theyab Abed. Water desalination and purification using desalination units powered by solar panels, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019;7(3), <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v7i3.748>.
21. Ahmed Zkear Abass, Pavlyuchenko DA, Zozan Saadallah Hussain. Survey about impact voltage instability and transient stability for a power system with an integrated solar combined cycle plant in Iraq by using ETAP. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2021;2(3). <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/author/index/completed>.
22. Abass AZ; Pavlyuchenko D.A; Zozan Saadallah Hussain. Methods Comparison for Optimal Capacitor Placement in Distribution System. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 6-9 Oct. 2020, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271381.
23. Pavlyuchenko DA, Lyubchenko VYa. Rating assessment of energy efficiency indicators based on the hierarchy analysis method. *Novoe v Rossiyskoy elektroenergetike*. 2017;11:77-91.
24. Reda M, Saied N, Khaldi A, et al. A. Iraq electrical power infrastructure - past, present and future developments and expectations. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition; Atlanta, GA*. 2006. pp. 1792-1795. doi: 10.1109/PSCE.2006.296184.
25. Alibage A. Assessing photovoltaic solar technologies as a solution for the problem of power shortage in Iraq. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*; Honolulu, HI; 2018. pp. 1-16. doi: 10.23919/PICMET.2018.8481984.
26. Khalidah A J Al-Qayim Integrated solar thermal combined cycle for power generation in Iraq Materials Science and Engineering, V. 518, *Electric and Electronic Engineering; Published under licence by IOP Publishing Ltd*. doi: 10.1088/1757-899X/518/4/042002.
27. Boumedjirek M, Merabet A, Feidt M, et al. *Performance evaluation of parabolic trough power plants on direct steam generation and integrated solar combined cycle system in Algeria*. International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Tangier; 2017. pp. 1-8. doi: 10.1109/IRSEC.2017.8477315.
28. Talukder P, Soori PK. *Integration of parabolic trough collectors with natural gas Combined Cycle power plants in United Arab Emirates*. International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE); Offenburg. 2015. pp. 62-69. doi: 10.1109/ICSGCE.2015.7454270.
29. Li C.-J, Li P, Wang K, et al. Survey of properties of key single and mixture halide salts for potential application as high temperature heat transfer fluids for concentrated solar thermal power systems. *AIMS Energy* 2(2). 2014. pp. 133-157. doi: 10.3934/energy.2014.2.133.
30. Amani M, Ghenaïet A, Smaili A. *Determination of the performance of a solar tower integrated with a Combined Cycle*. 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Rabat, Morocco. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/IRSEC.2018.8703000.

Authors of the publication

Ahmed Zkear Abass – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: theking.amir@mail.ru.

Dmitry A Pavlyuchenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: pavlyuchenko@corp.nstu.ru.

Vitaliy M. Less – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: lessv134@gmail.com.

Получено

21 января 2021г.

Отредактировано

25 февраля 2021г.

Принято

02 марта 2021г.



ОПЫТ СЖИГАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ УГОЛЬНОГО ШЛАМА НА ТЭЦ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

А.Н. Кудряшов, Т.В. Коваль, М.И. Ижганайтис

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Оценить возможность сжигания угольного шлама (отходов углеобогащения) в топках энергетических котлов на ТЭЦ Иркутской области. *МЕТОДЫ.* Для анализа сжигания отходов углеобогащения применялись технологические и математические методы исследований. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье представлен опыт использования отходов углеобогащения черемховского каменного угля на ТЭЦ-12 ПАО «Иркутскэнерго». Представлены результаты тепловых испытаний котла ТП-30 ТЭЦ-12 при проведении пробного сжигания гранулированных отходов углеобогащения совместно с отходами мраморного производства в смеси с головинским углём. В результате выявлено, что основные параметры работы котла практически не изменились, наблюдалось незначительное снижение температуры аэросмеси на выходе из мельниц по сравнению с чистым головинским углём, что обусловлено большей влажностью получаемой смеси, кроме того, наблюдается снижение выбросов диоксидов серы на 18-30% в зависимости от доли гранулированных отходов углеобогащения в смеси. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Опытные исследования, проводимые на ТЭЦ-12 при сжигании головинского угля в смеси с гранулированными отходами углеобогащения в количествах до 50% от общего количества смеси, свидетельствуют о том, что гранулированные отходы углеобогащения возможно сжигать без особых ограничений в работе оборудования ТЭЦ. На основании полученных результатов произведён анализ и разработаны рекомендации по сжиганию отходов углеобогащения.

Ключевые слова: угольный шлам, отходы углеобогащения, угольная энергетика, топливные гранулы, сжигание, экология окружающей среды, безотходные технологии.

Для цитирования: Кудряшов А.Н., Коваль Т.В., Ижганайтис М.И. Опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 33-45. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45.

EXPERIENCE OF COMBUSTION COMPOSITE FUEL AT A THERMAL POWER STATION IN THE IRKUTSK REGION

AN. Kudryashov, TV. Koval, M, Izhganaytis

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* To assess the possibility of burning coal sludge, waste of coal preparation, in the furnaces of power boilers at the thermal power station of the Irkutsk region. *METHODS.* Technological and mathematical research methods were used to analyze the incineration of coal preparation waste. *RESULTS.* The article presents the experience of using coal preparation wastes from Cheremkhovsky coal at CHPP-12 of Irkutskenergo. Presented are the results of thermal tests of the TP-30 boiler at CHPP-12 during the trial combustion of granular waste from coal enrichment together with waste from marble production mixed with Golovinsky coal. As a result, it was revealed that the main parameters of the boiler operation practically did not change, there was a slight decrease in the temperature of the air mixture at the outlet of the mills in comparison with pure Golovinsky coal, which is due to the higher moisture content of the resulting mixture, in addition, there is a decrease in sulfur dioxide emissions by 18-30% in depending on the proportion of granular waste of coal preparation in the mixture. *CONCLUSIONS.* Experimental studies carried out at CHPP-12 when burning Golovinsky coal

mixed with granular waste of coal preparation in amounts up to 30% of the total amount of the mixture indicate that granular waste of coal preparation can be burned without any special restrictions in the operation of the equipment of the CHPP. Based on the results obtained, an analysis was carried out and recommendations for the incineration of coal preparation wastes were developed.

Keywords: coal slurry, coal preparation wastes, coal energy, fuel granules, combustion, environment, non-waste technologies.

For citation: Kudryashov AN, Koval TV, Izhganaytis MI. Experience of combustion composite fuel at a thermal power station in the Irkutsk region. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):33-45. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45.

Введение

Уголь играет важную роль в современном мире. Кроме того, уголь – самое распространенное в мире и в России топливо [1]. Согласно данным международного энергетического агентства [2] в настоящее время мир сжигает больше угля, чем когда-либо за всю историю [3,4]. Стоит отметить, что в мире уделяется большое внимание использованию твердого топлива [5-8]. Россия является одним из мировых лидеров по производству угля, она занимает шестое место по объемам угледобычи после Китая, США, Индии, Австралии и Индонезии [9-11]. Кроме энергетических целей уголь используется и в различных отраслях промышленности, например, при производстве стали в металлургии применяется переработанный, обогащенный уголь – кокс.

В России переработка угля осуществляется на 65 обогатительных фабриках и установках. В 2018 году на обогатительных фабриках было переработано 199 млн. т, в том числе для коксования – 92,9 млн. т [12]. После обогащения углей остаются отходы – угольные шламы, которые накапливаются в отстойниках, не находят широкого практического применения и являются постоянным источником загрязнения окружающей среды. При этом вокруг многих углеперерабатывающих предприятий в гидроотвалах и отстойниках скапливается большое количество переработанного угля. Существенное изменение зольности и влажности таких отходов не позволяет использовать их в качестве топлива в существующих энергетических агрегатах [13]. Однако научные исследования [14,15] показывают возможность сжигания высокозольных шламов. Поэтому необходимо рассматривать различные способы сжигания отходов углеобогащения, что позволит не только улучшить экологическую обстановку в регионах, но и получить существенный экономический эффект. Кроме того, сжигание отходов углеобогащения является одной из актуальных тем, особенно в тех регионах, где уже накоплено значительное количество таких отходов.

Материалы и методы

В Иркутской области действует Ново-Гришевская обогатительная фабрика (ОФ), которая обогащает каменные угли Черемховского месторождения Иркутского бассейна, зольность которого составляет 30%, а обогащенный концентрат имеет зольность около 10%. Запасы отходов углеобогащения (ОУ) Ново-Гришевской ОФ ориентировочно составляют порядка 36 млн.т. На рис.1 представлен план гидроотвала Ново-Гришевской обогатительной фабрики. Габаритные размеры шламохранилища примерно 500×500м. Всего в окрестностях г.Черемхово расположено 9 полей с общим объемом около 100 млн.т.

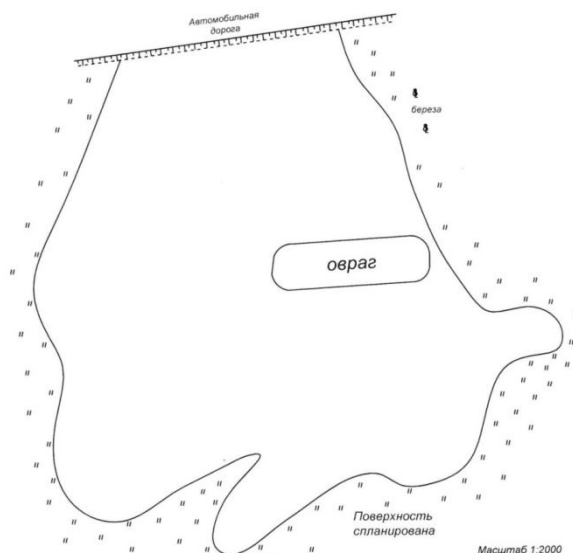


Рис.1. Схема гидроотвала Ново-Гришевской ОФ
Fig.1. Scheme of the Novo-Grishevskaya hydraulic dump OF

С целью снижения негативного влияния отходов углеобогащения на окружающую среду было принято решение рассмотреть варианты полезного использования отходов рассматриваемого производства.

Пробы ОУ с гидроотвала Ново-Гришевской ОФ отбирались методом «конверта» в соответствии со стандартной методикой. Метод «конверта» — способ отбора проб поштучного материала или материала, хранящегося насыпью, отбор проб осуществляется из углов и центра квадрата. Таким образом, гидроотвал ОФ представляет собой территорию площадью 11,8 га, строение — однородное. Точечные пробы отбирались в пределах однородного участка по равномерной сети, при этом была составлена схема участка с фиксацией мест отбора точечных проб (№ 4,5,6,7, и 8). На рис.2 показаны и пронумерованы места отборов проб ОУ. Кроме того, на гидроотвале находится овраг, поэтому для представительности результатов исследований отдельные точечные пробы были взяты со дна, середины и поверхности данного оврага (пробы № 1,2 и 3 соответственно). Полученные пять проб собирались вместе и тщательно перемешивались, после чего был получен усредненный образец. После отбора и приготовления проб были проведены анализы, результаты которых приведены в табл.1.

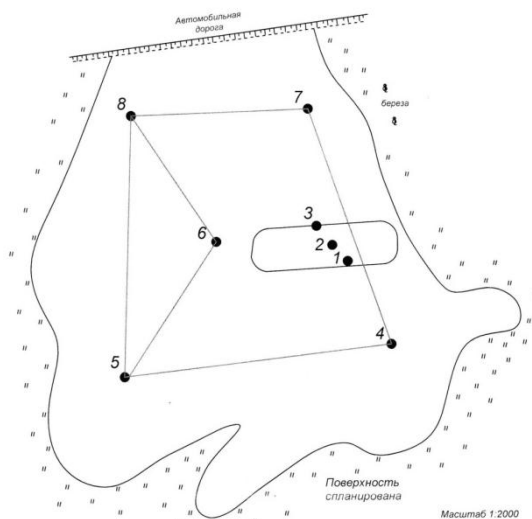


Рис. 2. Схема отбора проб отходов углеобогащения с гидроотвала Ново-Гришевской ОФ
Fig. 2. Scheme of sampling of waste of coal enrichment from the hydro dump of Novo-Grishevskaya OF

В 2011г. проводились первые опытные сжигания ОУ на ТЭЦ-12 ПАО

«Иркутскэнерго». Сжигание самих отходов в существующих котлах ТЭЦ не вызвало особых затруднений, однако возникли трудности в процессе подачи ОУ в мельницы на помол. На всем тракте топливоподачи наблюдались зависания и отложения частиц отходов, которые ограничивали производительность системы пылеприготовления котла. Анализируя сложившуюся ситуацию, было принято решение гранулировать ОУ, чтобы не возникало проблем с подачей их в мельницы с последующим сжиганием. Кроме того, для подавления оксидов серы в процессе сжигания в топливные гранулы на стадии их получения были добавлены кальцийсодержащие вещества. В качестве флюсующих добавок использовались отходы различных производств, а именно, мраморная крошка – отход добычи исходного продукта для Ангарского цементного завода (г. Слюдянка, «Карьер»), доломит Ново-Олхинского известкового завода (г. Шелехов, «ст. Известковая»), отходы производств АЭХК (г. Ангарск). Как известно, в составе мраморной крошки содержатся элементы, необходимые для процесса десульфуризации. Состав мраморной крошки представлен в табл.2.

Таблица 1

Данные приближенно-количественного рентгенофлуоресцентного анализа
шлама Ново-Гришевской ОФ

Пр о- бы	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	SrO	ZrO ₂
1	67,61	17,91	7,06	1,53	2,96	1,46	0,78	0,44	0,15	0,04	0,017	0,0095	0,011	0,0085
2	61,35	20,54	9,69	2,02	2,38	2,43	0,71	0,49	0,21	0,058	0,036	0,0219	0,012	0,012
3	58,80	21,96	10,04	2,28	2,87	2,21	0,87	0,61	0,21	0,055	0,029	0,0181	0,0218	0,012
4	63,78	18,93	9,71	2,12	1,96	2,07	0,64	0,43	0,22	0,045	0,03	0,0272	0,0099	0,012
6	64,47	18,74	9,38	2,09	1,92	1,97	0,65	0,42	0,21	–	0,032	0,0293	0,011	0,011
9	66,89	17,68	9,01	1,73	1,48	1,83	0,59	0,40	0,21	–	0,029	0,0254	0,0094	0,011

Таблица 2

Состав мраморной крошки

CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SrO	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O
46,13	17,52	13,55	0,379	0,0893	0,075	0,057	0,052	0,0225	0,0094	0,00524

Для дальнейшего исследования были получены топливные гранулы, смесь шлама ОФ и мраморной крошкой, внешний вид которых приведен на рис.2. Гранулы производились при помощи гранулятора тарельчатого типа. В качестве связующего использовалась битумная эмульсия (до 10 % от общего состава). Гранулы обычно имели шарообразную форму, средний диаметр которых колебался в диапазоне от 3 до 20 мм.



Рис. 3. Внешний вид гранул
Fig.3. Appearance of pellets

Результаты анализа гранул представлены в табл. 3.

Таблица 3

Состав гранул из отходов углеобогащения и мраморной крошки

Проба	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CO ₂	CaO	SO ₃	Fe ₂ O ₃
7	63,52	17,44	8,292	2,25	3,015	2,15	1,44
8	58,9	19,46	9,07	2,79	3,581	2,32	1,715
Проба	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	MnO	SrO	ZrO ₂
7	1,07	0,423	0,166	0,11	0,0115	0,0115	0,0086
8	1,29	0,482	0,183	0,10	0,0155	0,0142	0,011

В 2012-2013 гг. были проведены испытания на котле ТП-30 ст. № 7 ТЭЦ-12 ПАО «Иркутскэнерго» при сжигании отходов углеобогащения в смеси с головинским углём. Отходы углеобогащения были предварительно гранулированы с применением специального связующего материала (битумной эмульсии типа ЭБА-1) и добавлением флюсующей присадки (мраморная крошка). Общая масса отходов углеобогащения, сожженных на котле ст. № 7, составила около 30 т.

Котлоагрегат ТП-30 номинальной производительностью 30 т/час, с рабочим давлением 2,2 МПа, работающий на пыли каменного и бурого углей, вертикально-водотрубный, двухбарабанный с естественной циркуляцией, предназначен для выработки перегретого пара с температурой 375°C. На ТЭЦ-12 в котельной 1-й очереди установлены четыре котлоагрегата ТП-30, станционные номера № 5-8. Основные технические характеристики работы котла ТП-30 ст. № 7 ТЭЦ-12 представлены в табл.4.

Таблица 4

Техническая характеристика котлоагрегата ТП-30 ст. № 7

Наименование показателей	Размерность	Котел ст. №7
Паропроизводительность	т/час	30
Давление пара в барабане	МПа	2,2
Температура перегретого пара	°C	375
Температура уходящих газов	°C	173
Площади поверхностей нагрева:		
кипятильного пучка	м ²	238
экранов	м ²	106
водяного экономайзера	м ²	137
пароперегревателя	м ²	225
воздухоподогревателя	м ²	1035
Водяной экономайзер	-	Змеевиковый
Пароперегреватель	-	Змеевиковый
Воздухоподогреватель	-	Трубчатый из 3-х секций
Барабан верхний, диаметр наружный	мм	1387
Длина	мм	6105
Толщина стенки	мм	32
Барабан нижний, диаметр наружный	мм	761
Длина	мм	6105
Толщина	мм	20
Количество предохранительных клапанов на барабане	шт.	2
Количество предохранительных клапанов на пароперегревателе	шт.	1
Тип мельниц для пылеприготовления	-	ММА-1300/944
Питатель сырого угля	-	ШПСУ
Дутьевой вентилятор	-	ВД-10
Дымосос	-	Д-10
Золоулавливание	-	Сухое, батарейные циклоны

Котел ТП-30 ст. №7 ТЭЦ-12 рассчитан на сжигание черемховского каменного угля марки Д со следующими техническими характеристиками: $Q_i^r = 19,5$ МДж/кг (4660 ккал/кг), $W^r = 14\%$, $A^r = 21,5\%$, $V^{daf} = 45,0\%$, который является проектным топливом на

ТЭЦ-12. В качестве замещающего топлива используется уголь Головинского месторождения со следующими техническими характеристиками: $Q_i^r = 20,5$ МДж/кг (4900 ккал/кг), $W^r = 14\%$, $A^r = 21,5\%$, $V^{daf} = 45,0\%$.

В табл. 5 представлены данные по техническому составу смеси угля с гранулированными отходами углеобогащения (ГОУО) на период проведения испытаний. Значительный разброс величин по теплоте сгорания (см.табл.5) свидетельствует о неравномерном смешивании угля и ГОУО и существенном влиянии технических характеристик топлива на режим работы системы пылеприготовления и собственно котла.

Таблица 5

Опыт	Технические характеристики угля				
	Качественные характеристики угля				
	W^r	A^r	S_t^d	Q_i^r	
	%	%	%	ккал/кг	МДж/кг
1, 2	11,6	21,2	1,00	5101	21,37
3, 4	12,4	19,8	1,01	5143	21,55
5, 6	12,6	22,7	0,97	4905	20,55
7, 8	8,7	20,8	1,05	5376	22,53

Результаты

При опытах №1 и 2 соотношение угля и гранулированных отходов углеобогащения составило 70/30 %. При средней нагрузке на котле 23,6 т/ч и теплоте сгорания топлива 21,37 МДж/кг (5101 ккал/кг) коэффициент избытка воздуха составлял в среднем 1,44, что выше номинального, при этом по результатам анализа дымовых газов наблюдалось наличие СО до 130 мг/нм³. Коэффициент избытка воздуха поддерживался на уровне 1,44.

При опытах №3 и 4 соотношение угля и гранулированных отходов углеобогащения было 50/50 %. При средней нагрузке на котле 30,3 т/ч и теплоте сгорания топлива 21,55 МДж/кг (5143 ккал/кг) коэффициент избытка воздуха составлял в среднем 1,39, при этом по результатам анализа дымовых газов наблюдалось наличие СО до 160 мг/нм³.

При опытах №5 и 6 соотношение угля и гранулированных отходов углеобогащения составило 70/30 %. При средней нагрузке на котле 23,5 т/ч и теплоте сгорания топлива 20,55 МДж/кг (4905 ккал/кг) коэффициент избытка воздуха составлял в среднем 1,45, при этом по результатам анализа дымовых газов наблюдалось наличие СО до 325 мг/нм³.

Опыты №7 и 8 проводились на чисто головинском угле. При средней нагрузке на котле 28,4 т/ч и теплоте сгорания топлива 22,53 МДж/кг (5376 ккал/кг) коэффициент избытка воздуха составлял в среднем 1,49, при этом по результатам анализа дымовых газов наблюдалось наличие СО до 390 мг/нм³.

В табл. 6-7 приведены результаты работы котла ТП-30 при сжигании головинского угля в смеси с гранулированными отходами, полученные при опытах №1,3,5 и 7. В табл.8 представлены результаты анализа дымовых газов.

Таблица 6

Расчетные показатели работы котла ТП-30 ТЭЦ-12 (опыты №1 и 3)

Наименование величин	Обозн	Разм	Формула или обоснование	Значения	
				Опыт № 1	Опыт № 3
Доля ГОУО в топливе	—	%	—	30	50
Содержание балласта в топливе	B^r	%	$W^r + A^r$	32,8	32,2
Содержание углерода в топливе	C^r	%	$C_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	52,49	52,95
Содержание водорода в топливе	H^r	%	$H_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	3,76	3,80
Содержание серы в топливе	S^r	%	$S_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	1,00	1,01
Содержание азота в топливе	N^r	%	$N_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	0,87	0,88
Содержание кислорода в топливе	O^r	%	$O_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	9,07	9,15

Низшая теплота сгорания	Q_i^r	ккал/кг МДж/кг	Данные лаборатории ТЭЦ-12	5101,4 21,37	5142,8 21,55
Приведенный углерод	K^p	%	$C^r + 0,375S^r$	52,86	53,33
Топливная характеристика	β	—	$2,35(H^r + 0,04N^r - 0,126O^r) / K^p$	0,12	0,12
Давление острого пара	$P_{оп}$	кг/см ²	$P_{пп} + P_{бпр} / 735,5$	20,6	20,6
Давление питательной воды	$P_{пв}$	кг/см ²	$P_{пв} + P_{бпр} / 735,5$	22,1	22,1
Приведенная паропроизводительность котла	D_k^p	т/ч	$D_k \left(\frac{D_{пп}^p}{D_{пп}} \right)^{0,5}$	23,2	30,9
Приведенная влажность топлива	W^{np}	%·кг/ккал	$\frac{1000 \cdot W^r}{Q_i^r}$	2,35	2,49
Коэффициент	K	—	$3,5 + 0,02 \cdot W^{np}$	3,547	3,549
Коэффициент	C	—	$0,4 + 0,04 \cdot W^{np}$	0,49	0,50
Коэффициент	b	—	$0,12 + 0,014 \cdot W^{np}$	0,15	0,15
Множитель n	n	—	$\alpha''_{взп} / (\alpha''_{взп} + b)$	1,03	1,03
Потеря теплоты с уходящими газами	q_2	%	$0,01(K\alpha''_{взп} + C)(t_{yx.g} - nt_{xb})(1 - 0,01 \cdot q_4)$	7,71	7,89
Потеря теплоты с химическим недожогом	q_3	%	$0,00000254 \cdot (\alpha - 0,02) \cdot C_{CO}$	$3,81 \cdot 10^{-6}$	$3,86 \cdot 10^{-6}$
Потеря теплоты с механическим недожогом	q_4	%	$7830 A^r (a_{пл} C_{пл}^r / (100 - C_{пл}^r)) + a_{yh} C_{yh}^r / (100 - C_{yh}^r) / Q_i^r$	2,697	2,810
Потеря теплоты в окружающую среду	q_5	%	$0,75 \frac{D_k^{ном}}{D_k^p}$	1,486	1,118
Потеря теплоты со шлаком и золой	q_6	%	$684 \cdot A^r / Q_i^r / (100 - C_{пл}^r)$	0,028	0,027
КПД котла брутто	$\eta_k^{бр}$	%	$100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)$	88,080	88,151
Расход топлива	B_k	т/ч	$(D_k^p (i_{пп} - i_{пв}) + D_{пр} (i_6 - i_{пв})) / (\eta_k^{бр} Q_i^r \cdot 10^{-2})$	3,261	4,296

Таблица 7

Расчетные показатели работы котла ТП-30 ТЭЦ-12 (опыты №5 и 7)

Наименование величин	Обозн.	Разм.	Формула или обоснование	Значения	
				Опыт № 5	Опыт № 7
Доля ГОУО в топливе	—	%	—	30	0
Содержание балласта в топливе	B^r	%	$W^r + A^r$	35,28	29,46
Содержание углерода в топливе	C^r	%	$C_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	50,55	55,09
Содержание водорода в топливе	H^r	%	$H_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	3,63	3,95
Содержание серы в топливе	S^r	%	$S_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	0,97	1,05
Содержание азота в топливе	N^r	%	$N_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	0,84	0,92
Содержание кислорода в топливе	O^r	%	$O_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	8,74	9,52
Низшая теплота сгорания	Q_i^r	ккал/кг МДж/кг	Данные лаборатории ТЭЦ-12	4904,7 20,55	5376,1 22,53

Приведенный углерод	K^p	%	$C^r + 0,375S^r$	50,91	55,49
Топливная характеристика	β	—	$2,35(H^r + 0,04N^r - 0,126O^r) / K^p$	0,12	0,12
Давление острого пара	$P_{оп}$	кг/см ²	$P_{пп} + P_{бар} / 735,5$	20,6	20,5
Давление питательной воды	$P_{пв}$	кг/см ²	$P_{пв} + P_{бар} / 735,5$	21,8	21,8
Приведенная паропроизводительность котла	D_K^p	т/ч	$D_K \left(\frac{D_{пп}^p}{D_{пп}} \right)^{0,5}$	23,4	28,3
Приведенная влажность топлива	$W^{пр}$	% · кг/ккал	$\frac{1000 \cdot W^r}{Q_i^r}$	2,66	1,66
Коэффициент	K	—	$3,5 + 0,02 \cdot W^{пр}$	3,55	3,53
Коэффициент	C	—	$0,4 + 0,04 \cdot W^{пр}$	0,51	0,47
Коэффициент	b	—	$0,12 + 0,014 \cdot W^{пр}$	0,16	0,14
Множитель n	n	—	$\alpha''_{взп} / (\alpha''_{взп} + b)$	1,03	1,04
Потеря теплоты с уходящими газами	q_2	%	$0,01(K\alpha''_{взп} + C)(t_{ухг} - nt_{хв})(1 - 0,01 \cdot q_4)$	7,89	7,85
Потеря теплоты с химическим недожогом	q_3	%	$0,00000254 \cdot (\alpha - 0,02) \cdot C_{CO}$	$3,83 \cdot 10^{-6}$	$4,04 \cdot 10^{-6}$
Потеря теплоты с механическим недожогом	q_4	%	$7830 A^r \left(a_{шл} C_{шл}^r / (100 - C_{шл}^r) \right) + a_{ун} C_{ун}^r / (100 - C_{ун}^r) / Q_i^r$	2,587	2,648
Потеря теплоты в окружающую среду	q_5	%	$0,75 \frac{D_K^{ном}}{D_K^p}$	1,476	1,221
Потеря теплоты со шлаком и золой	q_6	%	$684 \cdot A^r / Q_i^r / (100 - C_{шл}^r)$	0,032	0,027
КПД котла брутто	$\eta_K^{бр}$	%	$100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)$	88,018	88,256
Расход топлива	B_K	т/ч	$\left(D_K^p (i_{пп} - i_{пв}) + D_{пр} (i_6 - i_{пв}) \right) / \left(\eta_K^{бр} Q_i^r \cdot 10^{-2} \right)$	3,416	3,759

Таблица 8

Результаты анализа дымовых газов (ДГ)

Параметр	Обозн.	Размерность	Значения			
			Опыт №1	Опыт №3	Опыт №5	Опыт №7
Содержание кислорода в ДГ перед ЗУУ	$O_{2\text{ЗУУ}}'$	%	7,2	7,4	7,3	8,0
Содержание оксида углерода в ДГ перед ЗУУ	$CO_{\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	29	24	35	37
Содержание оксида азота в ДГ перед ЗУУ	$NO_{\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	124	176	147	188
Содержание диоксида азота в ДГ перед ЗУУ	$NO_{2\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	678	688	687	624
Содержание оксидов азота в ДГ перед ЗУУ	$NO_{x\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	868	958	912	912
Содержание диоксида серы в ДГ перед ЗУУ	$SO_{2\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	1233	985	1126	1426
Содержание диоксида углерода в ДГ перед ЗУУ	$CO_{2\text{ЗУУ}}'$	%	16,1	16,3	15,8	16,5
Коэффициент избытка воздуха перед ЗУУ	$\alpha'_{\text{ЗУУ}}$	%	1,52	1,54	1,53	1,61
Содержание кислорода в ДГ за ВЗП	$O_{2\text{ВЗП}}''$	%	8,8	9,0	8,9	9,5
Содержание оксида углерода в ДГ за ВЗП	$CO_{\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	27	23	33	35
Содержание оксида азота в ДГ за ВЗП	$NO_{\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	101	156	121	148
Содержание диоксида азота в ДГ за ВЗП	$NO_{2\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	624	638	630	560
Содержание оксидов азота в ДГ за ВЗП	$NO_{x\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	779	877	815	787
Содержание диоксида серы в ДГ за ВЗП	$SO_{2\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	916	959	999	1286
Содержание диоксида углерода в ДГ за ВЗП	$CO_{2\text{ВЗП}}''$	%	15,1	15,1	14,2	16,4
Коэффициент избытка воздуха за ВЗП	$\alpha''_{\text{ВЗП}}$	%	1,57	1,52	1,57	1,62

Обсуждение

За время проведения испытаний технический состав средней пробы угля по двум пылесистемам изменялся в следующих диапазонах:

- влажность топлива W^r от 8,66% до 12,58%;
- зольность топлива A^r от 19,8% до 22,7%;
- низшая теплота сгорания топлива Q_i^r от 20,55 МДж/кг (4904 ккал/кг) до 22,53 МДж/кг (5376 ккал/кг).

Зависимость КПД котла брутто от паропроизводительности и от содержания ГОУО в смеси с головинским углём представлены на рис. 4 и 5 соответственно. На рис. 4-6 номера экспериментальных точек соответствуют номерам опытов.

Зависимость коэффициента избытка воздуха перед золоуловителем от содержания ГОУО в смеси с головинским углём показана на рис. 5.

Кроме того, в процессе анализа сжигания ГОУО был рассмотрен вопрос абразивного износа поверхностей нагрева котлоагрегата ТП-30. Как правило, абразивный износ проявляется в зоне температур дымовых газов ниже 600°C, когда золовые частицы теряют поверхностную пластичность и становятся твердыми, то есть в верхней части конвективной шахты котельного агрегата. Если температура стенки труб конвективных поверхностей нагрева парогенераторов не превышает 350°C, то золовой износ можно рассматривать как чисто механический процесс. При определении золового износа конвективных поверхностей нагрева коэффициент износа можно принимать равным коэффициенту абразивности золы, определяемому относительно материала котельных труб. Коэффициент абразивности золы определяется в зависимости от содержания в золе ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), % и рассчитывается по формуле $a_{20} = 0,045 \cdot (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 - 44) \cdot 10^{-12}$, м²/Н. Результаты расчетов сведены в табл.8.

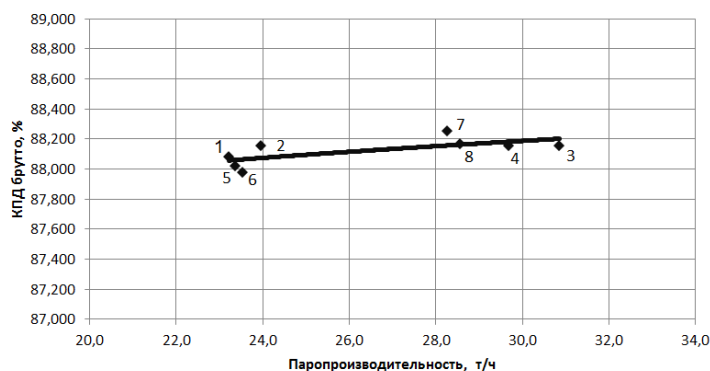


Рис. 4. Зависимость КПД котла брутто от паропроизводительности

Fig.4. Dependence of the gross boiler efficiency on the steam capacity

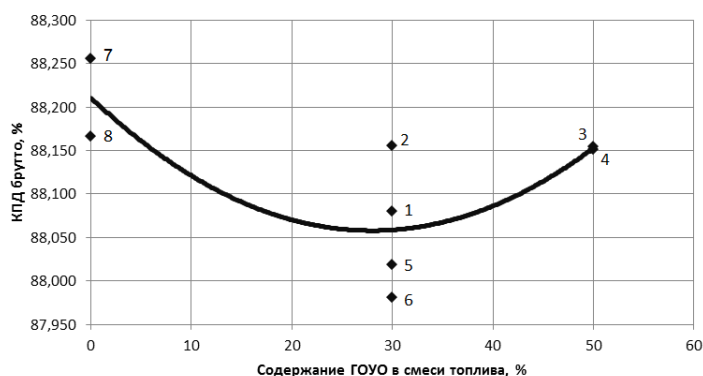


Рис. 5. Зависимость КПД котла брутто от содержания ГОУО в смеси с головинским углем

Fig.5. Dependence of the efficiency of the gross boiler on the content of GOO in the mixture with Golovinsky coal

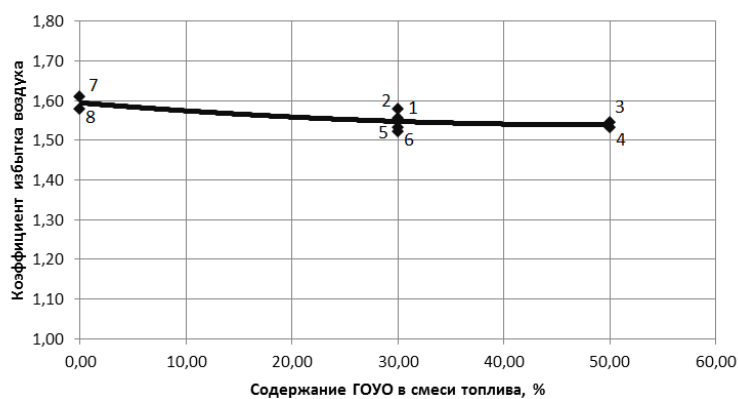


Рис. 6. Зависимость коэффициента избытка воздуха перед ЗУУ от содержания ГОУО в смеси с головинским углём

Fig.6. The dependence of the coefficient of excess air in front of the DCS on the content of the DCS in the mixture with Golovinsky coal

Таблица 7

Скорость абразивного износа конвективных поверхностей теплообмена						
Поверхность теплообмена	Скорость абразивного износа, мм/7000 час					
	30% гранул без мраморной крошки	30% гранул с мраморной крошкой	50% гранул без мраморной крошки	50% гранул с мраморной крошкой	70% гранул без мраморной крошки	70% гранул с мраморной крошкой
водяной экономайзер	0,25	0,264	0,272	0,299	0,298	0,341
воздухоподогреватель	0,0252	0,0266	0,0274	0,0301	0,03	0,0343

Связывание серы топлива с использованием отходов мраморного производства (мраморной крошки), содержащих в своем составе значительное количество оксидов CaO, MgO, определяет значительное связывание окислов серы.

Данный способ имеет ряд особенностей:

- изменяется химический состав и свойства золы, что приводит к увеличению шлакования поверхностей нагрева;
- изменяется количество золы, что приводит к увеличению абразивного износа;
- снижается концентрация диоксида серы и, как следствие, температура сернокислотной точки росы.

В табл.8 представлены расчетные исследования скорости низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя котлоагрегата ТП-30.

Таблица 8

Скорость низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя							
Показатель	Опыт						
	2	3	4	5	6	7	8
Температура точки росы, °C	114,5	109,28	104,94	105,16	94,82	100,28	78,47
Минимальная температура стенки трубок ВЗП, °C	79,95	80,9	80,7	81,64	81,31	82,34	82
Расчетная скорость низкотемпературной коррозии, мм/год	0,093	0,0982	0,097	0,1019	0,1	0,1048	0,1

Зависимость содержания SO₂ в дымовых газах от содержания ГОУО в смеси с головинским углём приведена на рис. 6.

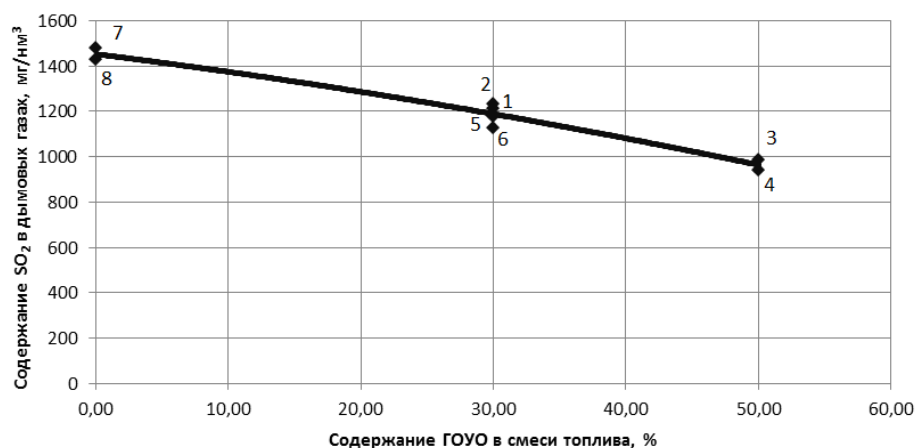


Рис. 7. Зависимость содержания SO₂ в дымовых газах от содержания ГОУО в смеси с головинским углем

Fig.7. Dependence of the SO₂ content in the flue gases on the content of the SOO in the mixture with Golovinsky coal

Выводы

Проведенные испытания при сжигании головинского угля в смеси с гранулированными отходами углеобогащения на котле ТП-30 ст. № 7 ТЭЦ-12 позволяют определить основные моменты, которые необходимо учитывать при разработке мероприятий при сжигании отходов углеобогащения на ТЭЦ-12 ПАО «Иркутскэнерго»:

основные параметры работы котла практически не изменились;

незначительное снижение температуры аэросмеси на выходе из мельниц по сравнению с чистым головинским углём обусловлено большей влажностью смеси;

в режиме работы тракта топливоподачи от разгрузочной эстакады до бункера сырого угля при транспортировке смеси существенных отклонений не выявлено;

наблюдается снижение выбросов диоксидов серы на 18-30% в зависимости от доли гранулированных отходов углеобогащения в смеси.

Таким образом, отходы углеобогащения Ново-Гришевской ОФ достаточно эффективно можно сжигать в топках энергетических котлов на ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго». Кроме того, опытные исследования, проведенные на ТЭЦ-12 при сжигании головинского угля в смеси с гранулированными отходами углеобогащения в количествах до 50% от общего количества смеси, свидетельствуют о том, что ГОУО возможно сжигать без особых ограничений в работе оборудования ТЭЦ.

Литература

- Кузнецов А.В., Бутаков Е.Б. Исследование влияния механической активации на горение угольного топлива // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. 37-44.
- Medium Term Coal Market Report 2016. Paris: International Energy Agency, 2016. 141 p.
- Coal information: overview. Paris: International Energy Agency, 2017. 8 p. [Электронный ресурс]. Доступно по URL: <https://doi.org/10.1787/coal-2017-en> (20.03.2020).
- Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., и др. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на ортанугольные топливные композиции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. 72-82.
- Lei Cai., Chun Zou., Yang Liu., et al. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O₂/H₂O atmospheres // Fuel. 2015. V. 139. P. 198-205.
- Briceland C.L., Khinkis M.J., Waibel R.T. Combustion Characteristics of Fine_Ground Coal // Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack Proc. Int. Symp. Akron, Ohio, 1983. Paper no. 10.
- The US Coal Crash. Evidence for Structural Change. London: Carbon Tracker Initiative, 2015. 48 p.
- Guttikunda S.K., Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India // Atmospheric Environment. 2014. V. 92. pp. 449–460.

9. Яновский А.Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России // Уголь. 2017. № 8. С.10-14.
10. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2017 года // Уголь. 2018. № 3. С. 58-73.
11. Глинина О.И. Угольная промышленность в России: 295 лет истории и новые возможности // Уголь. 2017. № 10. С. 4-11.
12. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2018 года // Уголь. 2019. № 3. С. 64-79.
13. Мурко В.И., Карпенко В.И. Разработка технологии комплексного использования побочных продуктов обогащения угля // Уголь. 2018. № 2. С.54-58.
14. Козлов В.А., Гарбер В. Сжигание высокосольных шламов как путь к безотходной технологии обогащения углей // Уголь. 2017. № 8. С.140-145.
15. Komilis D., Kissas K., Symeonidis A. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram, Waste Management, 34 (2014), pp. 249–255.
16. Кудряшов А.Н., Коваль Т.В. Использование вторичных ресурсов (отходов углеобогащения) для сжигания в топках ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго» // Журнал «Новости теплоснабжения»/ 2014. №3 (163). С.30-31.
17. Целуйко О.В., Волкова Т.П. К вопросу использования отходов углеобогащения. Материалы конференции. ДонНТУ, 2007. 43-47 с.
18. Тюрина Э.А., Ижганайтис М.И. Комплексные исследования возможности использования отходов предприятий углеобогащения в качестве альтернативного топлива // Материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». Иркутск: изд-во ИрНИТУ, 2013. С.156-160.

Авторы публикации

Кудряшов Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Институт энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Россия, e-mail: kan@istu.irk.ru.

Коваль Татьяна Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Институт энергетики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, e-mail: kovaltv@istu.irk.ru.

Ижганайтис Максим Иозо – магистрант, институт энергетики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия.

References

1. Kuznetsov AV, Butakov EB. Investigation of mechanical activation influence on fuel combustion. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016; 327(6): 37-44. Available at: URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/30948/1/bulletin_tpu-2016-v327-i6-04.pdf.
2. *Medium Term Coal Market Report* 2016. Paris: International Energy Agency, 2016. 141 p.
3. *Coal information: overview*. Paris: International Energy Agency, 2017. 8 p. Available at: <https://doi.org/10.1787/coal-2017-en>. Accessed to: 20th March 2020.
4. Kurgankina MA, Vershinina KYu, Ozerova IP, Medvedev VV. Thermal power plants switching from traditional fuels to coal water slurries containing petrochemicals. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018; 329(9):72-82. Available at: URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/51030/1/bulletin_tpu-2018-v329-i9-07.pdf.
5. Lei Cai, Chun Zou, Yang Liu. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O₂/H₂O atmospheres. *Fuel*. 2015;139:198-205.
6. Briceland CL, Khinkis MJ, Waibel RT. *Combustion Characteristics of Fine_Ground Coal. Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack Proc.* Int. Symp. Akron, Ohio, 1983. Paper no. 10.

7. *The US Coal Crash. Evidence for Structural Change*. London: Carbon Tracker Initiative, 2015. 48 p.
8. Guttikunda SK, Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India. *Atmospheric Environment*. 2014;92:449-460. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057> Accessed to: 20th March 2020.
9. Yanovskii AB. The main trends and development prospects of the coal industry in Russia. *Ugol'*. 2017;8:10-14. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-10-14>.
10. Tarazanov IG. The results of the coal industry of Russia in January-December 2017. *Ugol'*. 2018;3:58-73. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73>.
11. Glinina OI. Coal industry in Russia: 295 years of history and new opportunities. *Ugol'*. 2017;10:4-11. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-10-4-10>.
12. Tarazanov IG. The results of the work of the coal industry in Russia for January-December 2018. *Ugol'*. 2019;3:64-79. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-3-64-79>.
13. Murko VI, Karpenok VI. Development of a technology for the integrated use of by-products of coal preparation. *Ugol'*. 2018;2:54-58. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-4-54-59>.
14. Kozlov VA, Garber V. Combustion of high-ash sludge as a way to waste-free coal preparation technology. *Ugol'*. 2017;8:140-145. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-140-145>.
15. Komilis D, Kissas K, Symeonidis A. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram. *Waste Management*. 2014;34:249-255.
16. Kudryashov AN, Koval TV. Use of secondary resources (coal preparation waste) for combustion in the furnaces of the CHPP of Irkutskenergo. *Novosti teplosnabzheniya*. 2014;3(163):30-31.
17. Tseluiko OV, Volkova TP. *On the issue of using waste coal*. Materials conference. DonNTU. 2007. p.43-47.
18. Tyurina EA, Izhganaitis MI. *Comprehensive studies of the possibility of using waste from coal processing enterprises as an alternative fuel*. Materialy vsenos. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri» Materials vsenos. scientific-practical conf. from the international participation «Improving the efficiency of energy production and use in Siberia». 22–27 April 2013, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk national research technical university, 2013, p. 156-160.

Authors of the publication

Alexander N. Kudryashov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
e-mail: kan@istu.irk.ru.

Tatyana V. Koval – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
e-mail: kovaltv@istu.irk.ru.

Maxim I. Izhganaitis – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Получено	26 января 2021г.
Отредактировано	27 января 2021г.
Принято	27 января 2021г.



РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ ТРЁХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Р.Г. Мустафин, Ю.В. Писковацкий, Ф.Р. Сиразутдинов, Д.Ф. Губаев, А.Н. Гавриленко

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
ramil.mustafin@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Выявить закономерности влияния витковых замыканий на параметры трёхфазного трансформатора сети в режиме отключенного трансформатора с подачей контрольных напряжений и токов от постороннего источника, в линейном режиме работы трансформатора. МЕТОДЫ. Для достижения цели проводились экспериментальные исследования на силовом трансформаторе Trihal напряжением 20/0,4 кВ с искусственно созданным витковым замыканием, выполнялось математическое моделирование и расчеты параметров магнитной системы трехфазного трансформатора. РЕЗУЛЬТАТЫ. Были выполнены экспериментальные измерения напряжения холостого хода на стороне высокого напряжения силового трансформатора с подачей трехфазного напряжения прямой последовательности на сторону низкого напряжения трансформатора. Аналогичные измерения проведены с приложением трехфазного тока нулевой последовательности. Исследовано влияние виткового замыкания на магнитную систему трехфазного трансформатора с приложением напряжений и токов нулевой и прямой последовательностей. Разработана математическая модель магнитной системы трёхфазного трансформатора, позволяющая определить изменение параметров обмоток трансформатора и установить взаимосвязь между первичными и вторичными напряжениями и токами в условиях возникновения виткового замыкания. Параметры магнитной системы трехфазного трансформатора были вычислены по результатам экспериментальных измерений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложен эффективный метод обнаружения витковых замыканий по измерениям с подачей токов нулевой последовательности. Разработана упрощенная модель магнитной системы трёхфазного трансформатора, которая позволяет качественно оценить изменение его параметров при возникновении виткового замыкания. Предложена модель виткового замыкания, которая может использоваться для изучения влияния витковых замыканий на магнитную систему трансформатора.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, витковые замыкания, старение изоляции, моделирование.

Для цитирования: Мустафин Р.Г., Писковацкий Ю.В., Сиразутдинов Ф.Р., Губаев Д.Ф., Гавриленко А.Н. Разработка метода определения витковых замыканий в обмотке трёхфазного трансформатора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 46-58. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-46-58.

DEVELOPMENT OF A TURN-TO-TURN FAULT DETECTION METHOD IN THE THREE-PHASE TRANSFORMER'S WINDING

RG. Mustafin, YuV. Piskovatsky, FR. Sirazutdinov, DF. Gubaev, AN. Gavrilenko

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
ramil.mustafin@gmail.com

Abstract: THE PURPOSE. Reveal the regularities of turn-to-turn faults influence on to parameters of a three-phase network transformer in the disconnected transformer mode with the supply of control voltages and currents from an external source in the transformer linear operation. METHODS. To achieve the purpose, experimental studies were carried out on the

power transformer (Trihal with a voltage of 20 / 0.4 kV) with an artificially created turn-to-turn fault, mathematical modeling and calculations of the three-phase transformer magnetic system parameters. **RESULTS.** Experimental measurements of the open circuit voltage were performed on the power transformer high voltage side by applying a three-phase positive sequence voltage to the transformer low voltage side. Similar measurements were carried out using a three-phase zero sequence current. The influence of the turn-to-turn fault on the magnetic system of the three-phase transformer with the application of voltages and currents of zero and direct sequences is investigated. A mathematical model of three-phase transformer magnetic system has been developed, which makes it possible to determine the change in the parameters of the transformer windings and to establish the relationship between the primary and secondary voltages and currents in conditions of the occurrence of a turn-to-turn fault. The parameters of the three-phase transformer magnetic system were calculated from the results of experimental measurements. **CONCLUSION.** An effective method for detecting turn-to-turn faults by measurements with the supply of zero sequence currents is proposed. A simplified model of the three-phase transformer magnetic system has been developed. This model allows us to qualitatively evaluate the changes in the transformer parameters when a turn-to-turn fault occurs. A model of turn-to-turn fault is proposed, which can be used to study the effect of turn-to-turn fault on the transformer magnetic system.

Key words: power transformers, turn-to-turn faults, insulation aging, modeling.

For citation: Mustafin RG, Piskovatsky YuV, Sirazutdinov FR, Gubaev DF, Gavrilenko AN. Development of a turn-to-turn fault detection method in the three-phase transformer's winding *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):46-58. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-46-58.

Введение и литературный обзор

Витковые замыкания являются одной из основных причин повреждения силовых трансформаторов высокого и среднего класса напряжения [1, 2]. Как правило, именно с виткового замыкания начинаются межслойные и межкатушечные замыкания в обмотках. Стандартные методы определения витковых замыканий не обладают достаточной чувствительностью, поэтому не дают полной количественной оценки замкнувшихся витков [3-5], в некоторых случаях не определяют наличие виткового замыкания [6, 7]. Поэтому актуальной задачей является разработка новых чувствительных методов, позволяющих определять наличие витковых замыканий.

В основном витковые замыкания в обмотках трансформатора возникают в результате старения изоляции или при протекании токов внешних коротких замыканий (КЗ) по причине недостаточной электродинамической стойкости обмоток [8, 9]. Также витковое замыкание может произойти по причине производственного дефекта или при несоблюдении требований инструкции по технической эксплуатации трансформаторов [10].

Для проверки чувствительности новых методов к данному виду повреждений была разработана математическая модель магнитной системы трёхфазного трансформатора, позволяющая определять взаимосвязь первичных, вторичных токов и напряжений в обмотках трансформатора при возникновении виткового замыкания. Для верификации модели была произведена серия экспериментальных измерений параметров трансформатора в условиях моделирования виткового замыкания. Измерения выполнялись на силовом трансформаторе *Trihal* мощностью 160 кВА, напряжением 20/0,4 кВ производства компании *Shneider Electric*, параметры трансформатора представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры трансформатора <i>Trihal</i>	
Параметр	Значение
Мощность, кВА	160
Номинальное напряжение, кВ	20/0,4
Длина стержня, м	1,03
Длина ярма, м	0,85
Потери холостого хода, Вт	610
Напряжение КЗ, %	6

Особенностям моделирования внутренних повреждений трансформаторов были посвящены работы отечественных и зарубежных специалистов, достаточно подробный обзор представлен в работах [11, 12]. Большое число работ посвящено моделированию витковых замыканий [13], в том числе в программных комплексах, например, *Mathlab/Simulink* [14] или *ATP-EMPT* [15].

Магнитные потоки в трехфазном трансформаторе

Неизменность магнитного потока при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки является важнейшим свойством трансформатора. Из этого свойства следует закон равновесия магнитодвижущих сил (МДС) в трансформаторе: $F_1 + F_2 = F_0$, где F_1 и F_2 - МДС создаваемая первичной и вторичной обмотками при нагрузке, F_0 - МДС, создаваемая первичной обмоткой при холостом ходе. Нагрузочная составляющая тока первичной обмотки (первичный ток за вычетом тока холостого хода) не только уравнивает МДС вторичной обмотки, но и обеспечивает поступление в трансформатор из сети мощности, отдаваемой приемнику электрической энергии, подключенному к вторичной обмотке.

В реальном трансформаторе помимо основного магнитного потока Φ , замыкающегося по стали и сцепленного со всеми обмотками трансформатора, имеются также потоки рассеяния $\Phi\sigma_1$ и $\Phi\sigma_2$ (Рис. 1), сцепленные только с одной из обмоток.

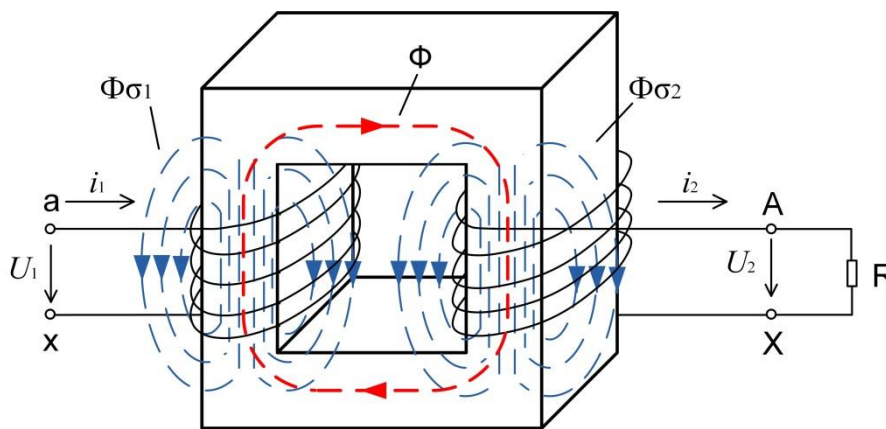


Рис. 1. Магнитные потоки в однофазном трансформаторе. i_1 , U_1 – ток и напряжение первичной обмотки, i_2 , U_2 – ток и напряжение вторичной обмотки, Φ – основной магнитный поток, $\Phi\sigma_1$ и $\Phi\sigma_2$ – потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток

Fig.1. Magnetic fluxes in a single-phase transformer. i_1 , U_1 - primary winding current and voltage, i_2 , U_2 - secondary winding current and voltage, Φ - main magnetic flux, $\Phi\sigma_1$ and $\Phi\sigma_2$ - scattering fluxes of the primary and secondary windings

Рассмотрим магнитные потоки в трёхфазном трансформаторе. Протекающий по первичной обмотке трансформатора ток I создает магнитное поле, а также суммарный магнитный поток Φ . Малая часть магнитного потока Φ замыкается по воздуху Φ_{ss} , не затрагивая магнитопровод. Большая часть магнитных линий замкнется по магнитопроводу, образуя основной магнитный поток Φ_0 . Некоторая часть магнитных линий, проходя по магнитопроводу, замкнется по воздуху, образуя поток рассеяния Φ_s .

Трёхфазный трансформатор имеет шесть обмоток (рис. 2): на каждом фазном сердечнике расположены обмотка первичная (1), и обмотка вторичная (2). Рассмотрим магнитную связь первичной и вторичной обмоток одной фазы трансформатора, например фазы А. Полный магнитный поток первичной обмотки Φ_A частично замкнется по воздуху, образуя магнитный поток рассеяния Φ_{SSA} (3), который будет пересекать только сечение первичной обмотки фазы А. Большая часть магнитных линий замкнется по стальному магнитопроводу (4), образуя основной магнитный поток Φ_{OA} (5), при этом $\Phi_A = \Phi_{SSA} + \Phi_{OA}$.

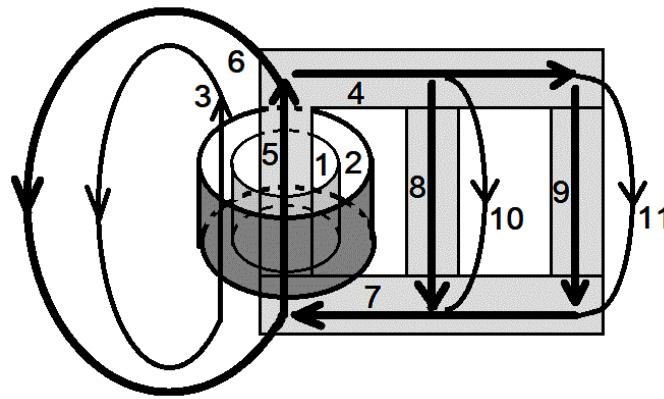


Рис. 2. Магнитная система трехфазного линейного трансформатора. 1- обмотка низкого напряжения фазы *A*, 2 - обмотка высокого напряжения фазы *A*, 3 – магнитный поток рассеяния Φ_{SSA} обмотки ВН фазы *A*, 4 – магнитопровод трансформатора, 5 – магнитный поток Φ_{OA} обмотки ВН фазы *A*, пересекающий магнитопровод, 6 – поток рассеяния Φ_{OSA} , 7 – замыкание по магнитопроводу магнитного потока Φ_{OA} , 8 – замыкание магнитного потока Φ_{OAB} по сердечнику фазы *B*, 9 – замыкание магнитного потока Φ_{OAC} по сердечнику фазы *C*, 10 – магнитный поток рассеяния Φ_{OSB} сердечника фазы *B*, 11 – магнитный поток рассеяния Φ_{OSC} сердечника фазы *C*

Fig.2. Magnetic system of three-phase linear transformer. 1- phase A low voltage winding, 2- phase A high voltage winding, 3- magnetic scattering flux F_{SSA} of the HV phase A winding, 4- transformer magnetic core, 5- magnetic flux F_{OA} of the HV phase A winding, 6- scattering flow FS , 7- short circuit of the magnetic flux of the F_{OA} along the magnetic circuit, 8- closure of the magnetic flux of the F_{OAB} along the core of the phase B, 9- closure of the magnetic flux of the F_{OAS} along the core of the phase C, 10- magnetic scattering flux F_{OSB} of the phase B core, 11- magnetic scattering flux F_{OSC} of the phase C core

Рассмотрим магнитную связь обмоток разных фаз, расположенных на разных сердечниках магнитопровода. Основной магнитный поток Φ_{OA} будет замыкаться частично по воздуху, образуя поток рассеяния Φ_{OSA} (6), который не будет пересекать сечения обмоток фаз *B* и *C*. Большая часть магнитного потока Φ_{OA} замкнется по магнитопроводу (7), пересекая сечения обмоток фаз *B* – поток Φ_{OAB} (8) и *C* – поток Φ_{OAC} (9). При этом происходит намагничивание сердечников фаз *B* и *C*, и часть магнитных потоков Φ_{OAB} и Φ_{OAC} также будут замыкаться по воздуху, минуя обмотки фаз *B* и *C*, образуя магнитные потоки рассеяния Φ_{OSB} (10) и Φ_{OSC} (11) соответственно.

Модель трёхфазного трансформатора

При расчётах магнитных цепей используется почти полная формальная аналогия с электрическими цепями. Магнитная цепь описывается правилами Кирхгофа для потоков Φ через её элементы сечением S и магнитных напряжений ΔF между её узлами. Каждая обмотка является источником магнитодвижущей силы (МДС), а поток через ветвь определяется магнитным напряжением на ней и её магнитным сопротивлением.

Таким образом, распределение магнитных потоков можно представить в виде электрической схемы, в которой магнитному потоку соответствует электрический ток, магнитным сопротивлениям соответствуют активные сопротивления. МДС, которая создает магнитный поток, может быть представлена в модели в виде ЭДС: $МДС_A = I_A \cdot W_A$, где I_A – ток катушки, W_A – количество витков катушки.

Модель магнитной системы трёхфазного трансформатора представлена на рис. 3, в которой резистор $R1$ соответствует магнитному потоку рассеяния обмотки ВН фазы *A*, резисторы $R3$, $R10$, $R11$ соответствуют магнитным потокам рассеяния обмоток фаз *A*, *B* и *C*, пересекающим магнитопровод, а резисторы $R2$, $R8$, $R9$ соответствуют магнитному сопротивлению стержней магнитопровода фаз *A*, *B*, *C* соответственно. Резисторы $R4$, $R5$, $R6$, $R7$ – соответствуют магнитному сопротивлению соответствующих участков ядра магнитопровода.

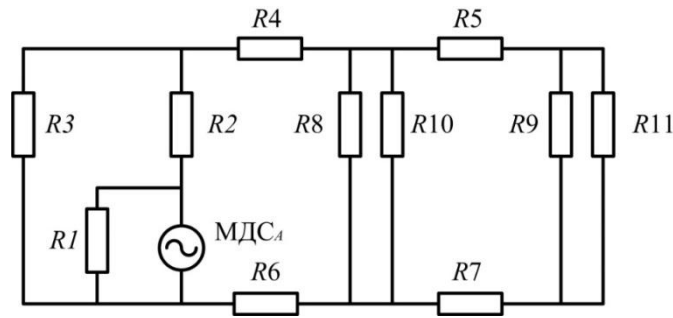


Рис. 3. Моделирование магнитной системы трансформатора, где MDS_A - магнитодвижущая сила первичной катушки фазы A , $R1$ – сопротивление, моделирующее магнитный поток рассеяния обмотки ВН фазы A ; $R2, R8, R9$ – магнитные сопротивления стержней магнитопровода фаз A, B, C соответственно; $R3, R10, R11$ – сопротивления, соответствующие магнитным потокам рассеяния обмоток фаз A, B и C , пересекающим магнитопровод; $R4, R5, R6, R7$ - магнитные сопротивления ярма магнитопровода

Fig.3. Simulation of the magnetic system of a transformer, where MDA is the magnetomotive force of the primary coil of phase A , $R1$ is the resistance simulating the magnetic flux of scattering of the HV winding of phase A ; $R2, R8, R9$ are the magnetic resistances of the magnetic core rods of phases A, B, C , respectively; $R3, R10, R11$ are the resistances corresponding to the magnetic flux of scattering of the windings of phases A, B , and C crossing the magnetic core; $R4, R5, R6, R7$ are the magnetic resistances of the magnetic yoke of the magnetic core

В данной модели сопротивления $R3, R10, R11$ являются магнитными сопротивлениями рассеяния обмоток фаз A, B и C . Учитывая, что магнитный поток рассеяния является распределенным в пространстве, введём в представленную выше модель сопротивления рассеяния, привязанные к центрам двух участков ярма магнитопровода. Предлагаемая модель позволяет учесть распределенную геометрию трёхстержневого трансформатора и уменьшить количество переменных в модели. Введённые сопротивления рассеяния $R12$ и $R13$ (рис. 4) будут иметь одинаковые значения, а также ввиду большого значения не будем учитывать сопротивления рассеяния, не связанные с магнитопроводом $R1$ (рис. 3). Сопротивления участков ярма магнитопровода, от центрального стержня до боковых стержней, представлены в виде двух одинаковых сопротивлений, равных половине сопротивления ярма $R4/2, R5/2, R6/2, R7/2$ (рис. 4). Таким образом, в модели остаются три независимых сопротивления: 1) одинаковые по величине сопротивления стержней магнитопровода $R2, R8, R9$; 2) одинаковые по величине сопротивления участков ярма магнитопровода $R4, R5, R6, R7$; 3) одинаковые по величине сопротивления рассеяния $R12$ и $R13$.

Предлагаемая выше модель магнитной системы трансформатора была реализована в программе *ElectronicsWorkbench*.

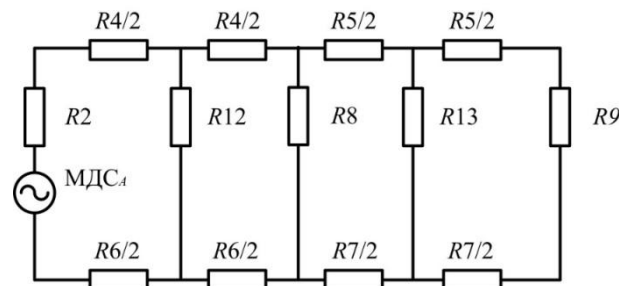


Рис. 4. Модель магнитной системы трансформатора, где MDS_A - магнитодвижущая сила первичной катушки фазы A ; $R2, R8, R9$ – магнитные сопротивления стержней магнитопровода фаз A, B, C соответственно; $R4, R5, R6, R7$ - магнитные сопротивления ярма магнитопровода; $R12, R13$ – одинаковые по величине сопротивления рассеяния

Fig.4. Model of the magnetic transformer system, where is the MDS_A - magnetomotive force of the primary coil of phase A ; $R2, R8, R9$ - magnetic resistances of magnetic core rods phase A, B, C respectively; $R4, R5, R6, R7$ - magnetic resistances of magnetic core yoke; ; $R12, R13$ - the same amount of scattering resistance

Материалы и методы

Рассмотрим связь компьютерной модели с результатами экспериментов на реальном трансформаторе.

Входной величиной для компьютерной модели являлись измеренные в эксперименте амплитуды и фазы токов в обмотках НН. Величины ЭДС (в вольтах) в модели, которые соответствуют МДС катушек реального трансформатора, брались численно равными соответствующим токам I фазных катушек НН (в миллиамперах): ЭДС [В] $\Rightarrow I$ [мА]. При моделировании виткового замыкания учитывались соотношения количества витков обмоток трансформатора и количество витков в искусственно созданном в эксперименте витковом замыкании на одном из стержней трансформатора (во всех экспериментах витковое замыкание моделировалось одним витком). Реальное МДС (в ампер-витках) можно подсчитать путём умножения тока фазной обмотки НН (в амперах) на количество витков в обмотке НН (в нашем случае 41 виток). При этом соотношение ЭДС в модели и реального МДС равно: ЭДС [В] / МДС [ампер-виток] = 1000/41 = 24,4.

Выходной величиной модели являются токи в ветвях, которым соответствуют магнитные потоки в стержнях реального трансформатора. В эксперименте измерялись ЭДС холостого хода в обмотках ВН, которые пропорциональны магнитным потокам в стержнях. Реальный магнитный поток в стержне Φ [Вб] можно подсчитать, разделив ЭДС [В] холостого хода обмотки ВН на угловую частоту и число витков (в нашем случае 3690 витков). Соотношение тока в ветвях модели I [А] к соответствующему магнитному потоку Φ [Вб] в стержнях трансформатора подсчитаем из эксперимента А (табл.2). Так в эксперименте ЭДС ВН фазы А равно 403,2 В, при этом ток ветви А в модели (рис.5) равен 43,64 мА. Из этих величин подчитаем соотношение: I [А] / Φ [Вб] = 125.

Связь параметров компьютерной модели с геометрическими размерами трансформатора, используемого в эксперименте. Принимая, что сечение ярма и стержней магнитопровода одинаково, а магнитное сопротивление пропорционально длине магнитного пути данного участка магнитопровода, можно выразить сопротивление ярма через сопротивление стержней магнитопровода. Длина магнитного пути ярма трансформатора $Trihal$ равна $L_y = 0,85$ м, длина магнитного пути стержней $L_c = 1,03$ м. В модели на рис.4 ярмо моделируется одинаковыми сопротивлениями (R_4, R_5, R_6, R_7), стержням соответствуют одинаковые сопротивления (R_2, R_8, R_9). Соответственно в модели, которую будем использовать для описания результатов измерений на трансформаторе $Trihal$, примем отношения сопротивлений ярма к величинам сопротивлений стержней равное: $(R_4/2)/R_2 = (0,85/4)/1,03 = 0,206$.

Размерности физических величин магнитных сопротивлений трансформатора и размерности соответствующих сопротивлений (R_4, R_5, R_6, R_7) и (R_2, R_8, R_9) модели разные, поэтому сопротивления модели мы можем взять произвольно, сохраняя только соотношения типа $(R_4/2)/R_2$. Величины магнитного сопротивления стержней примем как $R_2=R_8=R_9=1$ кОм, соответственно сопротивления $R_4/2=R_5/2=R_6/2=R_7/2=0,206$ кОм. Данные величины использовались для моделирования всех экспериментальных результатов, что дает возможность сравнивать выходные величины модели для различных экспериментов.

Абсолютные значения сопротивлений рассеяния R_{12}, R_{13} в модели на рис. 4 играют разную роль в двух типах экспериментов: эксперименты с подачей прямой последовательности тока или напряжения на обмотки трансформатора; эксперименты с подачей нулевой последовательности тока или напряжения на обмотки трансформатора. В первом случае сопротивления рассеяния не играют существенной роли, поэтому для описания данных экспериментов примем значение сопротивлений R_{12}, R_{13} на порядок большим, чем сопротивления стержней: $R_{12}=R_{13}=10 \cdot R_2=10$ кОм. Во втором случае, в экспериментах с подачей нулевой последовательности тока, сопротивления рассеяния играют определяющую роль в формировании магнитных потоков, и это даёт возможность экспериментально определить соотношение сопротивлений стержней и сопротивлений рассеяния R_2/R_{12} .

Сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования в упрощенной модели (рис.4) производилось как сравнение соотношений токов в ветвях модели (которые моделируют магнитные потоки в реальном трансформаторе), к соответствующим соотношениям измеренных в эксперименте ЭДС во вторичных обмотках ВН, которые пропорциональны магнитным потокам в стержнях реального трансформатора. При этом сравнивались соотношения данных в различных фазах (А, В или С) в одном эксперименте, так и соотношения данных одноименных фаз в различных экспериментах.

Были проведены лабораторные экспериментальные исследования на трансформаторе $Trihal$. В качестве трёхфазного источника тока использовался программно-технический

комплекс РЕТОМ-51, для измерения фазных токов и напряжений в обмотках трансформатора использовался цифровой вольтамперфазометр «Ретометр».

Результаты и обсуждение

А. Трансформатор на холостом ходу без виткового замыкания, на обмотку НН подано напряжение прямой последовательности.

От устройства РЕТОМ-51 подано напряжение прямой последовательности равное 4,5 В на обмотку НН трансформатора, соединение обмоток со стороны НН звезда, на стороне ВН обмотки между собой не соединены. С помощью вольтамперфазометра произведены измерения напряжения на стороне НН и ВН трансформатора, а также ток на стороне НН. Результаты измерений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений без виткового замыкания			
Параметр*	фаза A	фаза B	фаза C
Напряжение НН, В	$4,46 e^{j4^\circ}$	$4,47 e^{j120^\circ}$	$4,48 e^{-j119^\circ}$
Ток НН, А	$0,070 e^{-j49^\circ}$	$0,058 e^{j66^\circ}$	$0,080 e^{j173^\circ}$
Напряжение ВН, В	$403,2 e^{-j1^\circ}$	$405,1 e^{j119^\circ}$	$404,5 e^{-j120^\circ}$

Упрощенная модель магнитной системы трансформатора представлена на рис. 5, реализованная в программе *Electronics Workbench*. В модели величины МДС фазных обмоток обозначены как: *MDSa* – фазы A, *MDSb* – фазы B, *MDSc* – фазы C и представлены в виде источника напряжения. В результате расчёта компьютерной модели получены следующие значения токов: для фазы A – 43,65мА, для фазы B – 44,61мА, для фазы и C – 45,36мА. Рассчитанные токи ветвей в модели близки друг к другу по абсолютной величине, как и измеренные напряжения обмотки ВН (которые используются в данном случае для измерения магнитных потоков в стержнях), что указывает на адекватность упрощенной модели магнитной системы трансформатора. Для контроля введем отношение: измеренное напряжение ВН (в вольтах) к токам соответствующих фаз компьютерной модели (в миллиамперах) $K = U_{ВН}[В]/I[мА]$, которое для измерений из таблицы 2 и компьютерной модели из Рис.5 равно $Ka=403,2В/43,65мА=9,2$; $Kb=405,1В/44,61мА=9,1$; $Kc=404,5 В/45,36 мА=8,9$. Видно, что данное соотношение одинаково для разных фаз, и для всех последующих измерений данное соотношение должно быть примерно таким же, как в данном эксперименте.

Токи НН имеют разные значения для разных фаз, что явно показывает несимметричность магнитной системы трехфазного трансформатора: центральный и боковые стержни явно находятся в разных условиях относительно магнитных потоков.

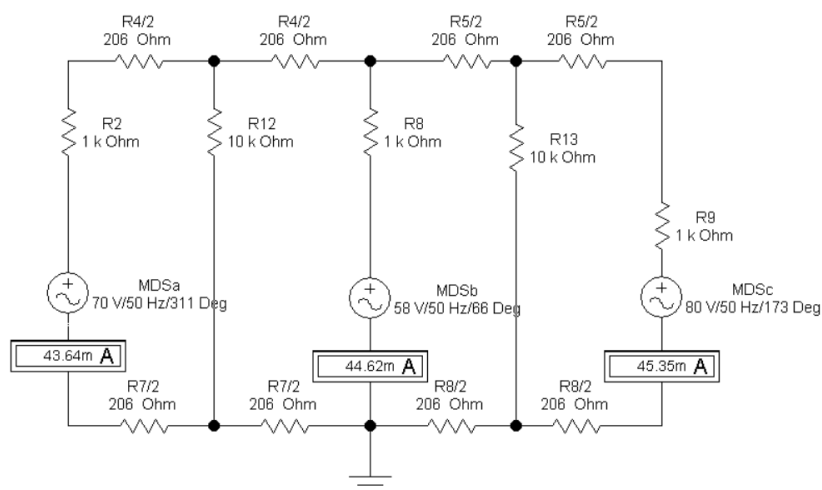


Рис. 5. Упрощенная модель магнитной системы трансформатора в программе *Electronics Workbench*, трансформатор на холостом ходу без виткового замыкания, на обмотку НН подано напряжение прямой последовательности

Fig.5. Simplified model of the magnetic system of the transformer in the Electronics Workbench program, the transformer is idling without a turn circuit, a direct sequence voltage is applied to the HH winding

* В таблицах фазы напряжений и токов указаны по отношению к напряжению, поданному на фазу A

Б. Трансформатор на холостом ходу, на обмотку НН подано напряжение прямой последовательности, витковое замыкание на фазе А

Физически витковое замыкание моделировалось путём накладывания короткозамкнутого витка медного провода сечением 5 мм², длиной 130 см. Виток охватывал стержень сердечника фазы А и замыкался через механический выключатель, что позволило оперативно включать и отключать витковое замыкание во время измерений. На стороне ВН обмотки не соединены друг с другом. От РЕТОМ-51 подаем напряжение 4,5 В прямой последовательности на обмотку НН трансформатора. Результаты измерений токов и напряжений сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений с витковым замыканием на фазе А			
Параметр	фаза А	фаза В	фаза С
Ток витка, А	$17,06 e^{j174^\circ}$		
Ток НН, А	$0,375 e^{-j8^\circ}$	$0,140 e^{j136^\circ}$	$0,218 e^{j171^\circ}$
Напряжение ВН, В	$381,5 e^{j0^\circ}$	$399,3 e^{j118^\circ}$	$404,3 e^{-j119^\circ}$

Влияние виткового замыкания на ф. А моделируется добавлением МДС виткового замыкания MDS_f (Рис.6), с учетом соотношения количества витков в витковом замыкании (1 виток) и количества витков в обмотке НН (41 виток): $MDS_f = (17,06/41)=0,416$. Рассчитанные в модели токи ветвей по фазам А и В пропорциональны измеренным напряжениям обмотки ВН, соотношения $K_a = 381,5 \text{ В} / 46,01 \text{ мА} = 8,3$; $K_b = 399,3 \text{ В} / 47,66 \text{ мА} = 8,4$; $K_c = 404,3 \text{ В} / 62,54 \text{ мА} = 6,5$. Видно, что и при добавлении виткового замыкания, компьютерная модель достаточно адекватно описывает эксперимент.

Аналогичные физические и модельные эксперименты были проведены на фазах В и С. Результаты этих экспериментов схожи с результатом, полученным для фазы А. Таким образом, можно заключить, что предложенная упрощенная модель магнитной системы трансформатора достаточно хорошо описывает реальный эксперимент по выявлению влияния виткового замыкания на параметры трёхфазного трансформатора.

Были проведены измерения с подачей на трансформатор прямой последовательности тока. Имеется существенное отличие в поведении системы при подаче на трансформатор прямой последовательности напряжения или тока. При подаче напряжения, включение виткового замыкания почти не изменяет магнитные потоки, но увеличивает подаваемые токи. При подаче прямой последовательности тока, поскольку подаваемый ток фиксирован, не происходит компенсации влияния виткового замыкания. Включение виткового замыкания уменьшает магнитный поток в стержне с витковым замыканием (в эксперименте в 4 раза), за счет дополнительного магнитного сопротивления виткового замыкания. Сравнение результатов эксперимента и данных модели показали достаточно хорошее соответствие данных компьютерной модели соответствующим результатам эксперимента.

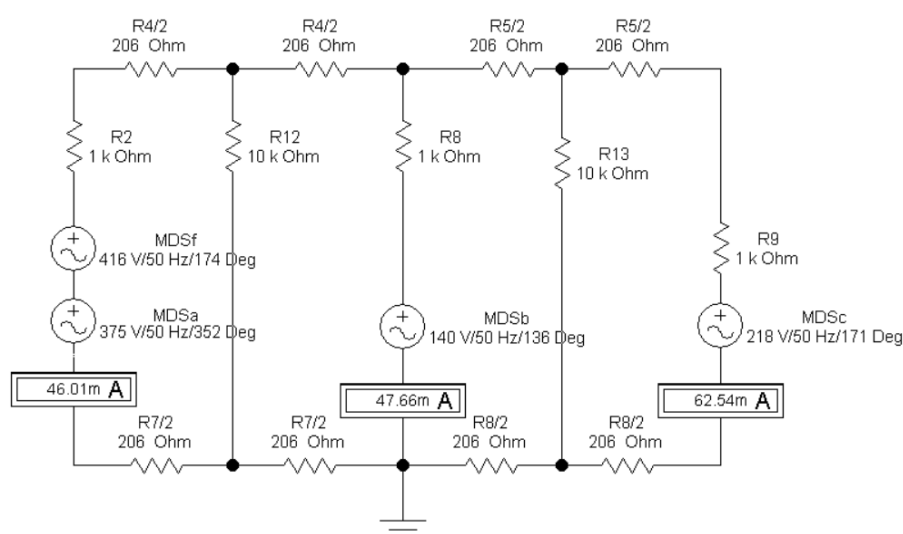


Рис. 6. Моделировании виткового замыкания на фазе А

Fig.6. Simulation of a loop closure in phase A

В. Трансформатор на холостом ходу, на обмотку НН подан ток нулевой последовательности.

Магнитное сопротивление рассеяния оказывает решающую роль при подаче нулевой последовательности на обмотки трехфазного линейного трансформатора, полностью обуславливая магнитные потоки в сердечнике. Поэтому данные эксперименты (совместно с экспериментами с подачей прямой последовательности) позволяют измерить соотношение магнитных сопротивлений стержней и магнитных сопротивлений рассеяния. При подаче на обмотки НН напряжения нулевой последовательности устройство РЕТОМ-51 отключается по короткому замыканию. Поэтому были проведены измерения с подачей на обмотки НН нулевой последовательности тока. В таком режиме все токи фаз равны 0,1 А, соответственно все МДС равны друг другу (Рис.7). Соотношения $Ka=3,7В/0,369мА=10$; $Kb=3,2В/0,432мА=7,4$; $Kc=3,6 В/0,369мА=9,7$, что близко к значениям в предыдущих измерениях.

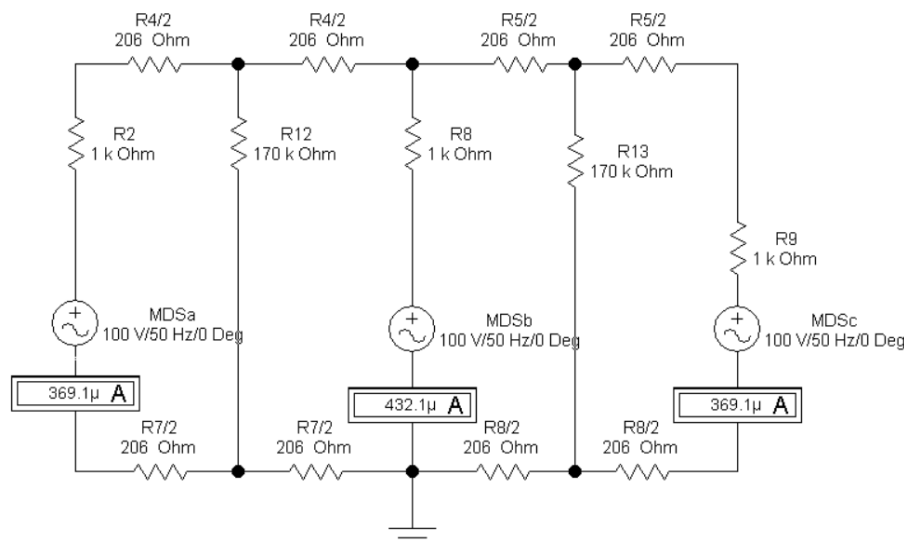


Рис. 7. Измерения с током нулевой последовательности

Fig.7. Zero-sequence current measurements

Результаты измерений сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений без виткового замыкания

Параметр	фаза A	фаза B	фаза C
Напряжение ВН, В	$3,7 e^{-j12^\circ}$	$3,2 e^{-j13^\circ}$	$3,6 e^{-j4^\circ}$
Напряжение НН, В	0,043	0,039	0,042

Вольтамперфазометр не позволяет измерять фазу для малых значений напряжений, поэтому в табл. 4 отсутствует фаза напряжения НН. Увеличение тока I_0 позволяет измерить и фазы (табл. 5).

Таблица 5

Результаты измерений без виткового замыкания

Параметр	фаза A	фаза B	фаза C
Напряжение НН, В; угол, градусы	$0,133 e^{-j9^\circ}$	$0,114 e^{-j5^\circ}$	$0,133 e^{-j4^\circ}$
Ток НН, А; угол, градусы	$0,308 e^{-j87^\circ}$	$0,305 e^{-j85^\circ}$	$0,305 e^{-j85^\circ}$
Напряжение ВН, В; угол, градусы	$10,9 e^{-j8^\circ}$	$9,17 e^{-j5^\circ}$	$11,05 e^{-j4^\circ}$

Наблюдается весьма малое напряжение на фазах НН и ВН, что обусловлено большой величиной магнитного сопротивления рассеяния $R12$, $R13$, относительно магнитного сопротивления стержней $R2$, $R8$, $R9$.

Г. Трансформатор на холостом ходу, на обмотку НН подан ток нулевой последовательности, витковое замыкание на фазе В

От устройства РЕТОМ-51 подан ток нулевой последовательности равный 0,1 А на обмотки НН. При моделировании виткового замыкания на фазе B , получим следующие значения напряжений на обмотках ВН: $U_A = 3,25 e^{-j7^\circ}$ В, $U_B = 0,19 e^{j3^\circ}$ В, $U_C = 3,60 e^{-j2^\circ}$ В. Соотношения $Ka = 3,25В/0,603мА=5,4$; $Kb = 0,19 В/0,04 мА = 4,7$; $Kc = 3,6В/0,603мА = 5,9$ близки для фаз A , B и

С, но отличаются от остальных экспериментов, что может быть связано с гистерезисом магнитной системы трансформатора в измерениях с малыми токами фаз.

В режиме тока нулевой последовательности магнитные потоки фаз уравниваются друг друга, поэтому данный режим подобен дифференциальным методам измерения наличия витковых замыканий в трансформаторе. Включение виткового замыкания (на фазе *B*) нарушает баланс магнитных потоков, соответственно напряжение холостого хода ВН на фазе *B* с витковым замыканием падает на порядок (Рис.8).

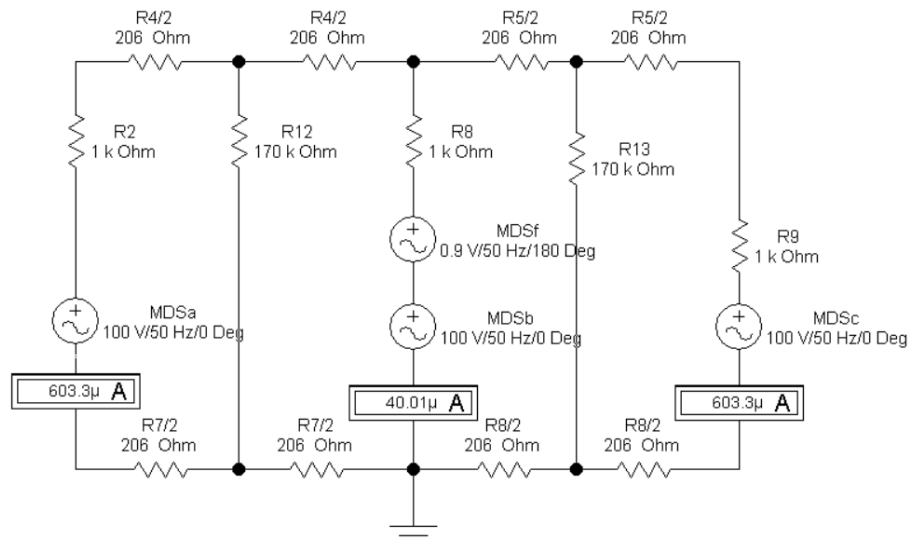


Рис. 8. Витковое замыкание на фазе B

Fig.8. Loop closure in phase B

Модель виткового замыкания

Использование источника напряжения для моделирования витковых замыканий накладывает определённые ограничения на применение вышеописанной модели, так как для того, чтобы задать значение напряжения *MDSf* – необходимо измерить значение тока в замкнувшихся витках. Поэтому необходимо разработать модель виткового замыкания, в программной среде *Electronics Workbench* данную модель можно представить в виде модуля. Обозначим этот модуль модели виткового замыкания как *Fault*.

Модель виткового замыкания представляет собой последовательно соединенное активное сопротивление с индуктивностью (рис. 9). Активное сопротивление короткозамкнутого медного витка, использовавшегося при проведении экспериментов, равно 5 мОм. Кроме сопротивления самого провода в цепи виткового замыкания включен выключатель, сопротивление контактов которого в модели приняли равным 20 мОм. Соответственно в модели (рис. 9) активное сопротивление виткового замыкания принимаем равным 25 мОм. Индуктивность виткового замыкания 72 мкГн является индуктивностью рассеяния.

Клеммы подключения модуля расположены слева, в цепи стоит преобразователь тока в напряжение. Далее в цепи стоит блок дифференцирования по времени d/dt , который моделирует наведение ЭДС в витковом замыкании от магнитного потока сердечника трансформатора, к которому подключена цепь из активного сопротивления и индуктивности. Далее ток в цепи обратно преобразуется в напряжение, которое моделирует *MDSf* во внешней цепи.

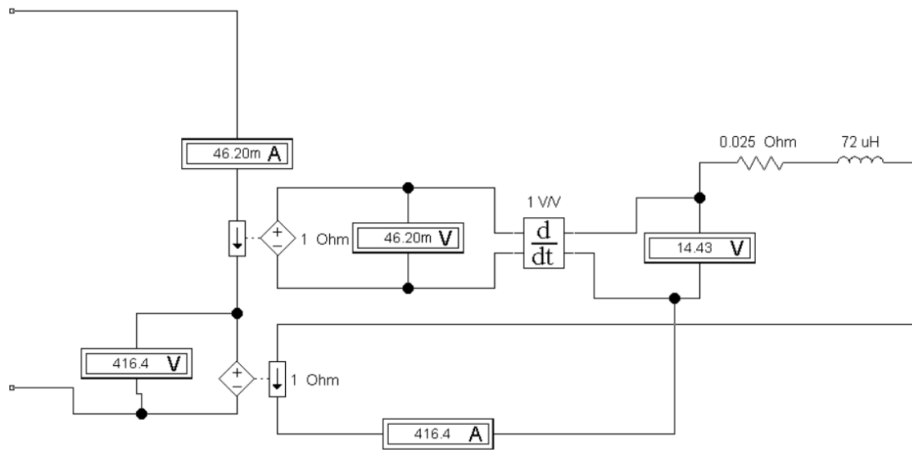


Рис. 9. Модель виткового замыкания *Fault*
Fig.9. Fault Loop Closure Model

В упрощенной модели магнитной системы трёхфазного трансформатора при моделировании виткового замыкания на фазе *A* (рис. 6) произведём замену МДС виткового замыкания *MDSf* на модуль *Fault* (рис. 10), при этом использует те же исходные значения МДС обмоток.

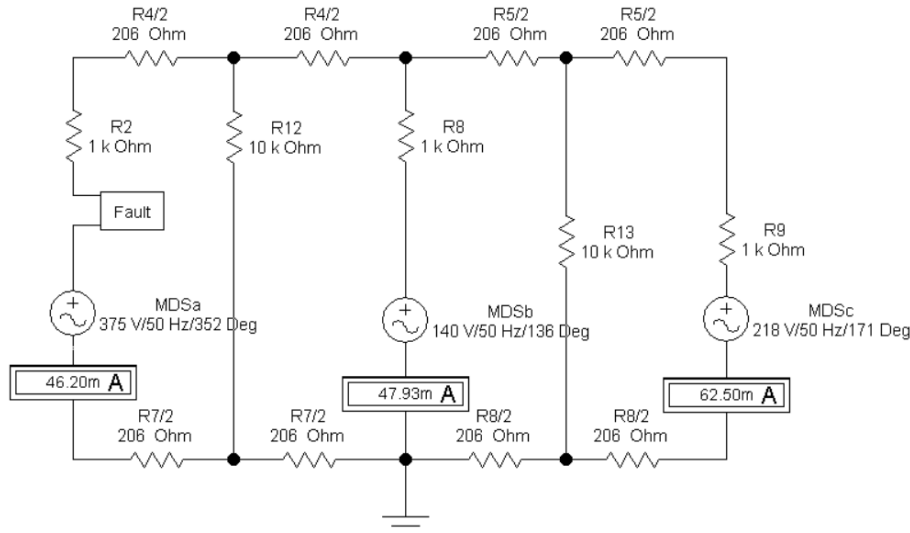


Рис. 10. Моделирование модулем *Fault* виткового замыкания на фазе *A*
Fig.10. Simulation of a phase A loop closure by the Fault module

Сравнивая значения токов в ветвях, представленных на рис. 6 и рис. 10 можно сделать вывод, что модель виткового замыкания *Fault* достаточно хорошо моделирует реальное витковое замыкание.

Заключение

1. Предложена модель магнитной системы трёхфазного трансформатора, которая позволяет качественно оценить изменение его параметров при возникновении виткового замыкания.
2. Предложена модель виткового замыкания, которая может использоваться для изучения влияния витковых замыканий на магнитную систему трансформатора.
3. Разработаны и показаны основы метода обнаружения витковых замыканий с использованием токов нулевой последовательности. Определено, что при подаче на обмотки трансформатора тока прямой последовательности, при подключении виткового замыкания, за счет дополнительного магнитного сопротивления виткового замыкания, магнитный поток в стержне с витковым замыканием уменьшается (в эксперименте в 4 раза). В то же время, при подаче на обмотки трансформатора тока нулевой последовательности, при подключении виткового замыкания значительно (на порядок в эксперименте) уменьшается магнитный поток в стержне с витковым замыканием. Таким образом, измерения с подачей нулевой и прямой последовательностей тока являются эффективными методами обнаружения витковых замыканий.

Литература

1. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // *Электричество*. 2010. № 2. С. 27-31.
2. Рубцов А.В., Лукьянов М.М. Анализ отказов силовых трансформаторов распределительных сетей // *Электробезопасность*. 2014. № 1. С. 19-32.
3. Zacharias D., Gokaraju R. Prototype of a Negative-Sequence Turn-to-Turn FaultDetection Scheme for Transformers // *IEEE Transactions on power delivery*. 2016. V. 31. N 1. pp. 122-129.
4. Oliveira Luís M. R., Marques Cardoso A. J. Comparing Power Transformer Turn-to-Turn Faults Protection Methods: Negative Sequence Component Versus Space Vector Algorithms // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. V. 53. I. 3. pp. 2817-2825.
5. Новожилов А.Н., Горюнов В.Н., Новожилов Т.А. Защита однофазного трансформатора от витковых замыканий в обмотках на встроенных магнитных трансформаторах // *Электротехника*. 2018. №2. С. 59-63.
6. Климова Т.Г., Смирнов В.С. Моделирование витковых замыканий в обмотках силового трансформатора в программном комплексе Matlab/Simulink // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2019. №4(55). С. 98-105.
7. Атнишкин А. Б., Широкин М. Ю. Моделирование витковых замыканий в обмотках силового трансформатора // *Труды VII международной научно-технической конференции "Электроэнергетика глазами молодёжи"*; 19–23 сентября 2016 г., Казань. Казань: КГЭУ, 2016. Т 1. С. 293-294.
8. Бартли У. Обзор повреждений трансформаторов // *Энергетика и менеджмент*. 2011. № 1(58). С. 40-45.
9. Хренников А.Ю., Рубцов А.В., Передельский В.А., Сафонов А.А., Якимов В.А. О повреждениях обмоток силовых трансформаторов и диагностике их геометрии методом низковольтных импульсов // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2004. № 5. С. 13-18.
10. Атнишкин А.Б. Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора. Дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары; 2019.
11. Martinez J.A., Mork B. A. Transformer modeling for low and mid-frequency transients – a review // *IEEE Trans. Power Del.* 2005. V. 20, N 2. pp. 1625-1632.
12. Кружаев А.В., Елагин И.А., Павлейно М.А. и др. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование переходных процессов в однофазном трансформаторе напряжения // *Журнал технической физики*. 2015. №2. С. 31-38.
13. Mejia-Barron A., Valtierra-Rodriguez M., Granados-Lieberman D. at al. The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents // *Measurement*. 2018. V. 117. pp. 371-379.
14. Ramesh K., Sushama M. Inter-turn fault detection in power transformer using wavelets // *International journal of emerging trends in electrical and electronics*. 2014. V. 10, I. 10.
15. Guillen D., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R. at al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // *Measurement*. 2019. V. 141. pp. 24-36.

Авторы публикации

Мустафин Рамиль Гамилович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

Писковацкий Юрий Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

Сиразутдинов Фарит Рамилевич – аспирант, ассистент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

Губаев Дамир Фатыхович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

Гавриленко Андрей Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Lvov MYu. Analiz povrezhdayemosti silovykh transformatorov napryazheniyem 110 kV i vyshе. *Elektrichestvo*. 2010; 2:27-31.
2. Rubtsov AV, Lukyanov MM. Analysis of failure of power distribution transformers. *Elektrobezopasnost*. 2014;1:19-32.
3. Zacharias D, Gokaraju R. Prototype of a Negative-Sequence Turn-to-Turn Fault Detection Scheme for Transformers. *IEEE Transactions on power delivery*. 2016;31(1):122-9. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2483524.
4. Oliveira Luís MR, Marques Cardoso AJ. Comparing Power Transformer Turn-to-Turn Faults Protection Methods: Negative Sequence Component Versus Space Vector Algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017;53(3):2817-25. doi: 10.1109/TIA.2016.2613506.
5. Novozhilov AN, Goryunov VN, Novozhilov TA. Protection of a single-phase transformer from interwinding failure in windings of integral magnetic transformers. *Russian Electrical Engineering*. 2018;89(2):118-121. doi: 10.3103/S1068371218020128.
6. Klimova TG, Smirnov VS. Turn fault modelling in the windings of a power transformer in the Matlab/ Simulink software package. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*. 2019; 55(4):98-105.
7. Aleksandr Atnishkin, Maksim Shirokin. Turn-to-turn faults modelling in the windings of power transformer. Trudy 7 mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodozhi»; 19–23 sentyabrya 2016 g., Kazan'. Kazan': KGEU, 2016;1:293-294.
8. Bartli U. Obzor povrezhdeniy transformatorov. *Energetika i menedzhment*. 2011; 58(1):40-45.
9. Khrennikov AYU, Rubtsov AV, Peredel'skiy VA, et al. O povrezhdeniyakh obmotok silovykh transformatorov i diagnostike ikh geometrii metodom nizkovol'tnykh impul'sov. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2004;5:13-18.
10. Atnishkin A.B. Adaptivnyye modifikatsii algoritma differentsial'noy zashchity transformatora. *Dis. kand. tekhn. nauk*. Cheboksary; 2019.
11. Martinez JA, Mork BA. Transformer modeling for low and mid-frequency transients – a review. *IEEE Trans. Power Del.* 2005;20(2):1625-32. doi: 10.1109/TPWRD.2004.833884.
12. Kruzhayev AV, Yelagin IA, Pavleyno MA, et al. Komp'yuternoye modelirovaniye i eksperimental'noye issledovaniye perekhodnykh protsessov v odnofaznom transformatore napryazheniya. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015;2:31-38.
13. Mejia-Barron A, Valtierra-Rodriguez M, Granados-Lieberman D. et al. The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents. *Measurement*. 2018;117:371-9. doi: 10.1016/j.measurement.2017.12.003.
14. Ramesh K, Sushama M. Inter-turn fault detection in power transformer using wavelets. *International journal of emerging trends in electrical and electronics*. 2014;10(10):1-5.
15. Guillen D, Olivares-Galvan JC, Escarela-Perez R, et al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization. *Measurement*. 2019;141:24-36. doi: 10.1016/j.measurement.2019.03.044.

Authors of the publication

Ramil' G. Mustafin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yuriy V. Piskovatskiy – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Farit R. Sirazutdinov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Damir F. Gubayev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey N. Gavrilenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

13 января 2021г.

Отредактировано

05 февраля 2021г.

Принято

08 февраля 2021г.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУЛЬСАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ

Хайбуллина А.И.¹ Зиннатуллин Н.Х.² Ильин В.К.¹

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия
haybullina.87@mail.ru

Резюме: На сегодняшний день загрязнение теплообменного оборудования приводит к серьезным экономическим убыткам в многих отраслях промышленности, поэтому поиски метода для снижения скорости или предотвращения загрязнения остается актуальной задачей. В данной работе предложено ЦЕЛЬ. Практическое решение для реализации пульсационного метода очистки на примере маслоохладителей. МЕТОДЫ. Проведено численное исследование влияния пульсационного потока на эффекты способствующие уменьшению загрязнений на внешней поверхности пучков труб. Численное исследование проводилось с использованием ПО Ansys Fluent. Течение жидкости описывалось уравнением Навье-Стокса, движение частиц и их взаимодействие описывалось методом дискретных элементов (DEM). При исследовании был рассмотрен шахматный пучок труб. Частота пульсаций соответствовала 0,3125 Гц, амплитуда отнесенная к диаметру трубки пучка 35, число Рейнольдса 100, скважность пульсаций соответствовала 0,25 В качестве рабочей среды было выбрано масло. Оценка пульсационной методики очистки осуществлялась на основе анализа механика соударения частиц о поверхность центрального цилиндра в пучке, при стационарном и пульсационном потоке. РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлено, что пульсационный поток способствует уменьшению загрязнений в передней области цилиндра и не эффективен в задней. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Анализ механики соударения частиц о поверхность теплообмена показал, что данный режим пульсаций эффективней для удаления пластичных отложений.

Ключевые слова: маслоохладитель; скорость эрозии; очистка теплообменников; низкочастотные несимметричные пульсации; метод дискретных элементов; шахматный пучок труб; математическое моделирование; пульсационная очистка, пульсирующие течения, загрязнения теплообменной поверхности.

Благодарности: Статья выполнена в рамках научного проекта 18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки энергоэффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса».

Для цитирования: Хайбуллина А.И., Зиннатуллин Н.Х., Ильин В.К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 59-67. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-59-67.

IMPROVING HEAT EXCHANGER EFFICIENCY USING THE PULSED METHOD OF CLEANING

AI. Haibullina¹, NX. Zinnatullin², VK. Ilyin¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
haybullina.87@mail.ru

Abstract: The fouling of heat exchange equipment leads to serious economic losses in many industries, therefore to find a method to reduce deposits on heat transfer surfaces remains an

actual task. THE PURPOSE. In this paper, a practical solution is proposed for the implementation of a pulsating cleaning method of oil coolers as an example. METHODS. The influence of pulsations on cleaning of the external surface of the heat exchanger is studied by computer modeling with Ansys Fluent. The fluid flow was described by the Navier-Stokes equation, particle motion and their interaction was described by the discrete element method (DEM). In the study, a staggered tube bundle was considered. The pulse frequency 0.3125 Hz, the amplitude referred to the diameter of tube is 35, the Reynolds number 100, the duty cycle of the pulsations 0.25. Oil was chosen as the medium. RESULTS. Evaluation of the pulsating cleaning method was carried out on the basis of the analysis of the mechanics of particle collisions on the surface of the central cylinder in the beam, with stationary and pulsating flow. It was found that the pulsating flow helps to reduce deposits in the front of the cylinder and is not effective in the back. CONCLUSION. An analysis of the mechanics of particle impact on the heat exchange surface showed that this pulsation mode is more effective for removing plastic deposits.

Keywords: oil cooler, erosion rate, heat exchanger cleaning, low-frequency asymmetrical impulses, discrete element method, staggered tube bundle, mathematical modeling; pulsating cleaning, pulsating flow; surface contamination.

Acknowledgments: The article is executed within the framework of the scientific project 18-79-10136 «Theoretical methods for modeling and developing energy-efficient import-substituting cleaners and deep processing of hydrocarbon raw materials at enterprises of the fuel and energy complex».

For citation: Haibullina AI, Zinnatullin NX, Ilyin VK. Improving heat exchanger efficiency using the pulsed method of cleaning. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):59-67. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-59-67.

Введение

Загрязнение теплообменников остается на сегодняшний день одной из основных нерешенных проблем в области теплоэнергетики, а нахождение лучшего метода для предотвращения или снижения скорости загрязнения продолжает быть актуальной задачей. Эффективность систем маслоснабжения насосных установок и турбоприводов зависит от стабильной и бесперебойной работы маслоохладителей. Стабильная работа маслоохладителей характеризуется постоянной теплопроизводительностью и гидравлическим сопротивлением. Температура масла на выходе из маслоохладителя может увеличиться ввиду ряда причин. Например, в связи увеличением температуры охлаждающей воды или с загрязнением поверхности теплообмена, что введет к увеличению расхода охлаждающей воды [1].

При эксплуатации маслоохладителя его теплопроизводительность Q может снизиться в результате ряда причин:

- попадание воздуха в корпус маслоохладителя;
- засорение трубных досок;
- загрязнение поверхности теплообмена;
- увеличение температуры охлаждающей воды связанные с пиковыми нагрузками;
- засорение водяных фильтров и как следствие уменьшение охлаждающей воды.

Основной причиной снижения Q является загрязнения поверхности теплообмена. В этом случае для восстановления Q необходимо очистка маслоохладителя. Очистка может производиться, как механически, путем разбора маслоохладителя с дальнейшей промывкой поверхности теплообмен, так и без разбора (реагенты, гидродинамическая очистка). Очистка с водяной стороны проще по сравнению очистки со стороны масла, в силу того, что масло находится в межтрубном пространстве (здесь загрязненная поверхность теплообмена является более трудно доступной).

Традиционный химический метод очистки теплообменников требует утилизации химических реагентов после очистки, а также остановки работы агрегата на время удаления загрязнений. В этом свете пульсационные методы интенсификации теплообменных процессов представляются перспективным способом очистки, т.к. они не требуют разборки агрегатов, а также остановки их работы. Импульсный поток создает высокие периодические ускорения жидкости, которые могут вызывать более быстрое разрушение слоя отложений из-за увеличения напряжения сдвига, действующего на поверхность. Данный метод может решить проблему очистки внешней поверхности труб в пучке, наиболее труднодоступной части для очистки в теплообменном аппарате.

Периодический нестационарный поток хорошо зарекомендовал себя в качестве метода интенсификации теплообмена. В работах [2,3] исследовалось влияние наложенных пульсаций на поток теплоносителя в теплообменнике типа в трубе. В результате экспериментальных исследований обнаружено, что с увеличением интенсивности пульсаций происходит рост теплоотдачи. В работах [4,5] исследуется теплообмен при поперечном обтекании цилиндра в условиях наложенных пульсаций потока. В результате проведенных экспериментальных исследований показано, что пульсации потока приводят к интенсификации теплообмена как при ламинарном [4], так и при турбулентном течении [5]. В работах [6,7], также обнаружено увеличение теплоотдачи одиночного цилиндра при вынужденных пульсациях потока. Интенсификация теплообмена наблюдается при принудительных пульсациях потока в трубе [8], при обтекании полуцилиндра [9,10], и других препятствий [11,12]. Не смотря на имеющиеся положительные результаты в применении пульсирующих потоков для интенсификации теплообмена в пучках труб для потоков воздуха [13], воды [14] и масла [15], экспериментальных и теоретических исследований их влияния на очистку внешней поверхности труб в пучке в настоящее время недостаточно [16–18]. Поэтому в данной работы было исследование влияния пульсационного потока на эффекты, способствующие удалению отложений на внешней поверхности пучков труб, а также предложено практическое решение для реализации пульсационного метода очистки маслоохладителей.

Постановка задачи исследования

На рис. 1 предложена модернизированная схема системы охлаждения подшипников насосно-силового агрегата для перекачки нефтепродуктов оснащенная пульсационной установкой рис. 1. Предложенное схемное решение было использована [1,19] для восстановления теплопроизводительности маслоохладителя при загрязнении теплообменной поверхности. Увеличение теплопроизводительности осуществлялось за счет интенсификации теплообмена в межтрубном пространстве маслоохладителя пульсирующим потоком. Данное практическое решение также может использовано для реализации пульсационного метода очистки маслоохладителей.

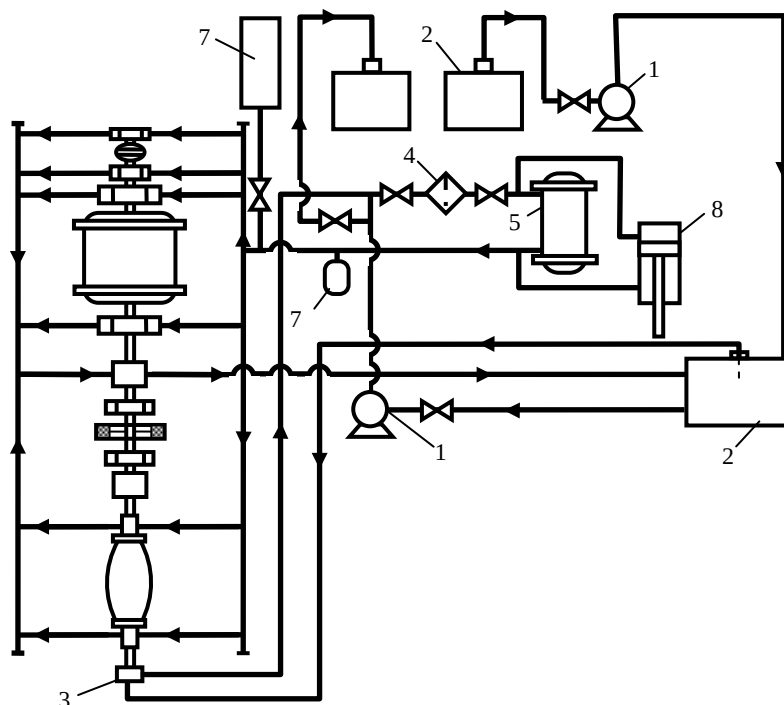


Рис. 1. Модернизированная схема насосно-силового агрегата:

1 – шестеренчатый насос; 2 – бак; 3 – насосно-силовой агрегат; 4 – фильтр; 5 – маслоохладитель;
6 – аккумуляторный бак; 7 – гидроневмобак; 8 – пульсационная установка

Fig.1. The upgraded scheme of the pump-power unit: 1- gear pump, 2-tank, 3- pump and power unit, 4- filter, 5-oil cooler, 6- storage tank, 7-hydropneumobak, 8- ripple installation

На рис. 2 показана схема ПУ. Насос 1 всасывает рабочую жидкость (масло) из бака 9 и подает в гидроцилиндр (ГЦ) 8 через гидрораспределитель 7, обратно в бак масло возвращается через радиатор 6 и фильтр 5. Гидрораспределитель служит для изменения направления движения поршня ГЦ 11 и поршня пульсатора 12, поскольку поршень ГЦ

связан общим штоком с поршнем пульсатора. Полость пульсатора 13 связана с входным штуцером маслоохладителя (по потоку масла) (рис. 2), полость пульсатора 14 с выходным штуцером маслоохладителя. Поэтому при уменьшении объема в полости 13 пульсатора (прямой ход поршня) происходит увеличение давления на выходе из маслоохладителя и уменьшению на входе в связи с расширением полости 14 пульсатора, что приводит к остановке и смене направления движения потока масла в маслоохладителе. При изменении направления движения (обратный ход) поршня пульсатора происходит увеличение давления на входе в маслоохладитель и уменьшение на выходе соответственно, что приводит к повторному развороту потока масла и ускорению его течения.

Таким образом, поток масла в маслоохладителе совершает возвратно-поступательное движение с заданной частотой f амплитудой A/d и скважностью ψ пульсаций. Необходимая f и ψ задается путем установки времени срабатывания электромагнитных клапанов гидрораспределителя, A/d длиной рабочего хода поршня пульсатора.

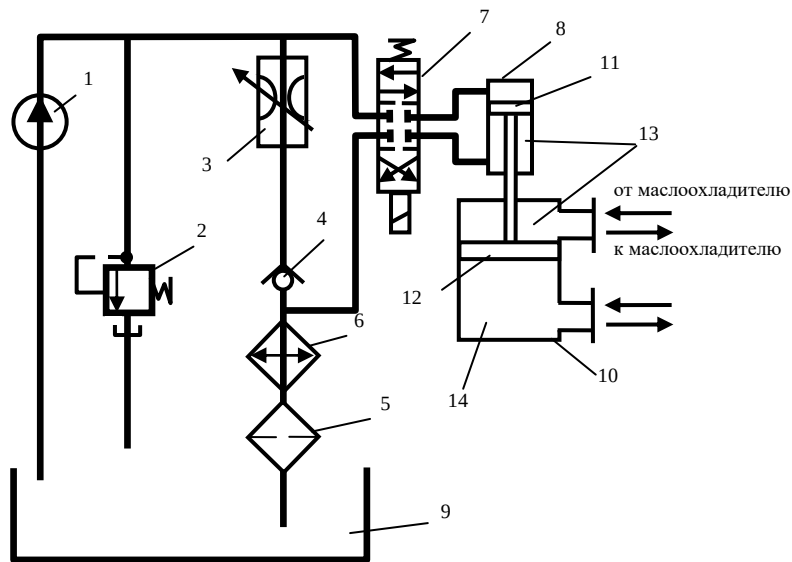


Рис. 2. Схема ПУ:

1 – насос; 2 – клапан предохранительный; 3 – дроссель; 4 – клапан обратный; 5 – фильтр; 6 – радиатор; 7 – гидрораспределитель; 8 – ГЦ; 9 – бак; 10 – пульсатор; 11 – поршень ГЦ; 12 – поршень пульсатора; 13, 14 – полости пульсатора

Fig.2. PU scheme: 1-pump, 2- safety valve, 3- throttle, 4- check valve, 5- filter, 6- radiator, 7- hydraulic distributor, 8- GTZ, 9- tank, 10- pulsator, 11- GTZ piston, 12- pulsator piston, 13, 14- pulsator cavities

Для оценки влияния режимов пульсирующего потока на условия способствующие очистке было проведено численное исследование.

Течение масло в пучке труб описывалось уравнением Навье-Стокса, с применением модели турбулентности Спаларта-Аллараса SA. Расчетная область математической модели представляла собой двухмерный пучок труб с расположенными в нем половинками трубок в шахматном порядке рис. 3. На входе в канал задавались параметры пульсирующего потока.

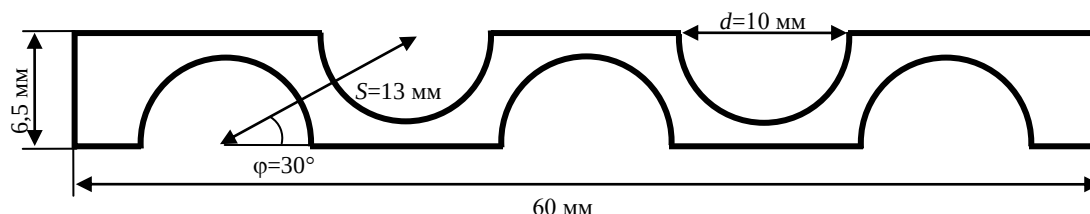


Рис. 3. Геометрия численного эксперимента

Fig.3. Geometry of a numerical experiment

Наибольшее влияние на скорость эрозии оказывают скорость падения частиц, а также их угол удара, поэтому в этой работе мы учитывали воздействие именно этих факторов. Диаметр и массовый расход были постоянными для идентичных условий, соответственно эти факторы одинаково влияют на скорость эрозии в стационарном и в импульсном режиме, поэтому эти факторы мы не учитывали. Влиянием шероховатости

стенки и вязкости жидкости на эрозию мы пренебрегли. Подробное описание деталей численного эксперимента приведено в работе [20].

Обсуждение результатов

Моделирование было проведено в ПО *Ansys Fluent* методом конечных объемов для этого расчетная область была поделена на 4220 ячеек. ПО *Ansys Fluent* [21] позволяет узнать значения координат и скоростей всех частиц в любой момент времени.

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (1)$$

где x_i, y_i – координаты i -ой частицы, x_0, y_0 – координаты центра окружности. Считаем частицу ударившейся в стенку, если $r_i \leq R_{\text{трубы}} + r_{\text{частицы}}$.

Из координат частицы, ударившейся в стенку, мы также нашли тангенс угла наклона прямой, перпендикулярной касательной к поверхности стенки в месте удара:

$$\text{tg} \varphi_i = \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \rightarrow \varphi_i = \arctg \left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) \quad (2)$$

В исследовании нам нужны были только те частицы, которые летели к стенке. Поэтому для упрощения расчетов вектор скорости частицы был переведен из системы координат O_{xy} в систему O_{ba} , где ось O_b – касательная к поверхности стенки в месте соударения, а O_a – перпендикуляр к касательной, проходящий через точку соударения и центр окружности полутрубы (рис. 4). С помощью матрицы поворота системы координат переводим скорость частицы в новых координатах:

$$v_{bi} = v_{xi} \cos \gamma \mp v_{yi} \sin \gamma \quad (3)$$

$$v_{ai} = v_{yi} \cos \gamma \pm v_{xi} \sin \gamma \quad (4)$$

где v_{xi}, v_{yi} – значение скорости i -ой частицы в координатах O_{xy} , v_{bi}, v_{ai} – в координатах O_{ba} , γ – угол поворота новой системы координат относительно старой, верхний знак указан для положительного направления вращения против часовой стрелки, нижний – по часовой

$$\text{стрелке} \left(\gamma = \begin{cases} 90^\circ - \varphi, & \text{при } \varphi < 90^\circ \\ \varphi - 90^\circ, & \text{при } \varphi > 90^\circ \end{cases} \right)$$

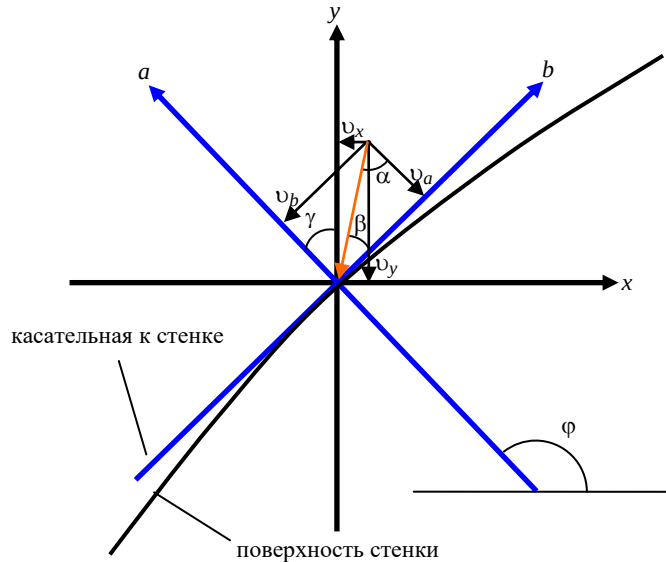


Рис. 4. Иллюстрация направления вектора скорости: стрелка оранжевого цвета – направление вектора скорости, угол φ – угол наклона прямой, перпендикулярной касательной к поверхности, угол γ – угол поворота системы координат, угол β – угол удара частицы

Fig.4. Illustration of the direction of the velocity vector: the orange arrow- is the direction of the velocity vector, the angle φ - is the angle of inclination of the straight line perpendicular to the tangent to the surface, the angle γ - is the angle of rotation of the coordinate system, the angle β - is the angle of impact of the particle

Соответственно, если $v_{ai} < 0$, то частица летит к стенке, и мы учитываем ее в наших расчетах. За угол падения частицы принимаем острый угол между вектором скорости и осью Ob , находим его следующим образом:

$$\beta_i = 90^\circ - |\alpha_i|, \quad \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{v_{bi}}{v_{ai}} \quad (5)$$

Модуль скорости i -ой частицы в момент удара равен:

$$v_i = \sqrt{v_{ai}^2 + v_{bi}^2} \quad (6)$$

На рис. 5 представлено количество частиц, угол падения которых входит в диапазон $15 \leq \beta \leq 25$ и $75 \leq \beta \leq 90$ и $75 \leq \beta \leq 90$. Средняя скорость частиц в момент удара на рис. 6. Результаты приведены для лобовой и кормовой части центральной трубки в пучке (рис. 3).

Приведенные диапазоны углов были выбраны для исследования исходя из того, что для хрупких материалов на скорость эрозии наибольшее влияние оказывают углы ударов наиболее близкие к 90° , а для пластичных - максимум эрозии достигается при углах равных 20° .

Время также было отложено в относительных значениях, где 0 – начало периода, а 1 соответствует длине периода T . Режим пульсаций соответствовал значениям амплитуды $A/d = 35$, частоты $f = 0,3125$ Гц, скважности $\psi = 0,25$ и числу Рейнольдса $Re = 100$. Плотность масла соответствовала $\rho = 854$ кг/м³, динамическая вязкость $\mu = 0,014$ Па · с. Количество частиц, ударившихся в лобовой части возросло (рис. 5) как для углов в диапазоне $15 \leq \beta \leq 25$, так и при углах $75 \leq \beta \leq 90$ (значения >1), средняя скорость частиц также возросла (рис. 6), по сравнению со значениями для стационарного потока. Таким образом, можно сделать вывод, что эрозия лобовой части возросла как для хрупких загрязнений, так и для пластичных. Скорость эрозии в кормовой части трубки снизилась, т.к. снизилась скорость удара частиц.

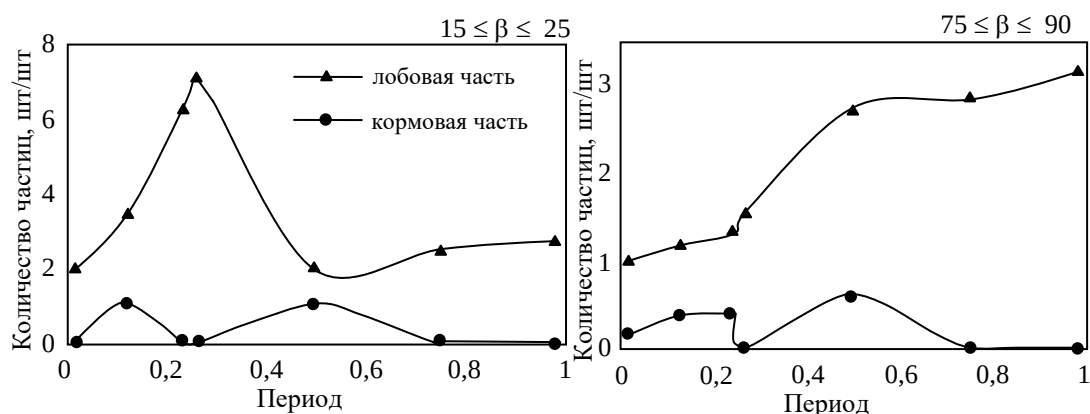


Рис. 5. Количество частиц в относительных единицах, ударившихся под углом в диапазоне $15 \leq \beta \leq 25$ (слева) и $75 \leq \beta \leq 90$ (справа)

Fig.5. The number of particles in relative units impacted at an angle in the range $15 \leq \beta \leq 25$ (left) and $75 \leq \beta \leq 90$ (right)

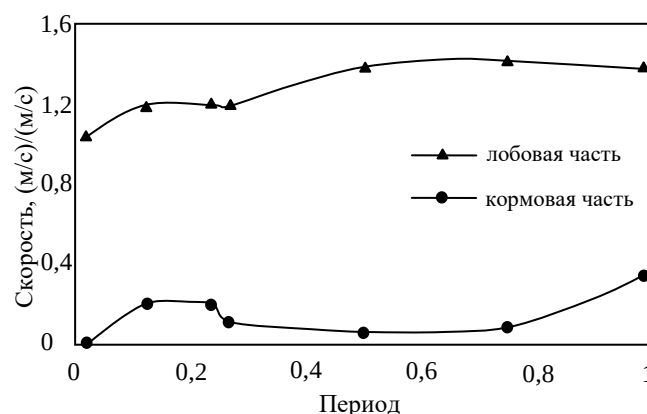


Рис. 6. Средняя скорость частиц в момент в относительных единицах

Fig.6. Average particle velocity per moment in relative units

Выводы

Для лобовой части рубки количество частиц в относительных единицах ударившихся под углом в диапазоне $15 \leq \beta \leq 25$ больше частиц ударившихся под углом $75 \leq \beta \leq 90$, что говорит о большем потенциале применения пульсаций для очистки загрязнений из пластичных отложений.

Для кормовой части трубы рубки количество частиц ударившихся под углом в диапазоне $15 \leq \beta \leq 25$ и $75 \leq \beta \leq 90$ меньше стационарного течения (значения <1). Для улучшения условий способствующих очистке в кормовой зоне необходимы дополнительные исследования при других параметрах пульсаций.

Литература

1. Хайбуллина А.И. Повышение эффективности теплообменных аппаратов наложением на поток в межтрубном пространстве низкочастотных пульсаций: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / А.И. Хайбуллина; [Место защиты: ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет]. 2017. С. 229.
2. Zohir A.E. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows // New York Science Journal. 2011. V. 4, №6. P. 61-71.
3. Zohir A.E., Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes. // J. Am. Sci. 2012. V. 8. P. 241-250.
4. Guoneng Li, Youqu Zheng, Guilin Hu, Zhiguo Zhang, Yousheng Xu Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows // Heat Transfer Engineering. 2016. V. 37, № 6. pp. 535-544.
5. Li G., Zheng Y., Xu Y., et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement from a heated circular cylinder with constant heat input power in turbulent pulsating crossflows // Heat and Mass Transfer. 2014. V. 50, № 6. pp. 1417-1427.
6. Molochnikov V. M., Mikheev N. I., Mikheev A. N., Paereliy A.A. Heat transfer from a cylinder in pulsating cross-flow // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. V. 24, №4. С. 569-575.
7. Mikheev N. I., Molochnikov V. M., Mikheev A. N., Dushina O. A. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V.109. pp. 254-265.
8. Wang X., Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. V. 47. pp. 3957-3970.
9. Bhalla N., Dhiman A.K. Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017. V. 39, № 8. pp. 3019-3037.
10. Srivastava A., Dhiman A. Pulsatile flow and heat transfer of shear-thinning power-law fluids over a confined semi-circular cylinder // The European Physical Journal Plus. 2019. 134(4). pp. 1-17.
11. Martin E., Velazquez A. & Valeije A. (2018) Heat transfer downstream of a 3D confined square cylinder under flow pulsation // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2018. V. 74. № 12. pp. 1747-1769.
12. Velazquez A., Arias J.R., Mendez B. Laminar heat transfer enhancement downstream of a backward facing step by using a pulsating flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. V. 51. pp. 2075-2089.
13. Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Goltsman A.E., Paereliy A.A., Aslaev A.K. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow // Journal of Physics: Conference Series 2018. P. 012024.
14. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Синявин А.А., Ильин В.К. Исследование теплоотдачи в коридорном пучке труб при наложении на поток противоточных несимметричных низкочастотных пульсаций // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. Т 12, № 1. С. 312-315.
15. Ilyin V.K., Sabitov L.S., Haibullina A.I., Hayrullin A.R. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016". 2017. V. 240, № 1. pp. 1-10.
16. Bode K. Hooper R. J., Paterson W. R., Wilson D. I., Augustin W., Scholl S. Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling // Heat Transfer Engineering. 2007. V. 28, № 3. pp. 202-209.

17. Scholer M., Fuchs T., Augustin W., Scholl S., Majschak J.P. Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures / Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning. 2009. pp. 455-463.

18. Augustina W., Fuchs T., Föste H., Schöler M., Majschakb J.P., Scholl S. Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing // Food and Bioproducts Processing. 2010. V. 8. pp. 384-391.

19. Haibullina A.I., Sabitov L.S., Hayrullin A.R., Ilyin V.K. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler / OP Conf. Series: Materials Science and Engineering 412. 2018. pp. 1-6.

20. Липагина А.Д. Использование пульсаций для очистки теплообменных аппаратов: магист. диссертация / Липагина А.Д. [Место защиты: ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет]. 2019. С. 75.

21. ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, 18.2.0. 2017.

Авторы публикации

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: haybullina.87@mail.ru.

Зиннатуллин Назиф Хатмуллович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Ильин Владимир Кузьмич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), проректор по непрерывному образованию, Казанский государственный энергетический университет. E-mail: ilyinvk@mail.ru.

References

1. Khaibullina AI. *Improving the efficiency of heat exchangers by imposing on the flow in the annular space of low-frequency pulsations*. PhD dissertation. ... Kazan State Power Engineering University, Kazan, 2017. P. 229.

2. Zohir AE. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows. *New York Science Journal*. 2011;4(6):61-71.

3. Zohir AE. Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes. *J. Am. Sci.* 2012;8:241-250.

4. Guoneng Li, Youqu Zheng, Guilin Hu, et al. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows. *Heat Transfer Engineering*. 2016;37(6):535-544.

5. Li G, Zheng Y, Xu Y, et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement from a heated circular cylinder with constant heat input power in turbulent pulsating crossflows. *Heat and Mass Transfer*. 2014;50(6):1417-1427.

6. Molochnikov VM, Mikheev NI, Mikheev AN, et al. Heat transfer from a cylinder in pulsating cross-flow. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017;24(4):569-575.

7. Mikheev NI, Molochnikov VM, Mikheev AN, et al. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;109:254-265.

8. Wang X, Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005;47:3957-3970.

9. Bhalla N, Dhiman AK. Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017;39(8):3019-3037.

10. Srivastava A, Dhiman A. Pulsatile flow and heat transfer of shear-thinning power-law fluids over a confined semi-circular cylinder. *The European Physical Journal Plus*. 2019;134(4):1-17.

11. Martin E, Velazquez A. & Valeije A. (2018) Heat transfer downstream of a 3D confined square cylinder under flow pulsation. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2018;74(12):1747-1769.

12. Velazquez A, Arias JR, Mendez B. Laminar heat transfer enhancement downstream of a backward facing step by using a pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008;51:2075-2089.
13. Molochnikov VM, Mikheev AN., Goltsman AE, et al. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow. *Journal of Physics: Conference Series* 2018. P. 012024.
14. Haibullina AI, Hayrullin AR, Sinyavin AA, et al. Issledovaniye teplootdachi v koridornom puchke trub pri nalozhenii na potok protivotochnykh nesimmetrichnykh nizkochastotnykh pul'satsiy. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologi*, 2013;12(1):312-315.
15. Ilyin VK, Sabitov LS, Haibullina AI, et al. *External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016". 2017;240(1):1-10.
16. Bode K, Hooper RJ, Paterson WR, et al. Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling. *Heat Transfer Engineering*. 2007;28(3):202-209.
17. Scholer M, Fuchs T, Augustin W, et al. *Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures*. Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning. 2009. P. 455-463.
18. Augustina W, Fuchs T, Föste H, et al. *Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing*. Food and Bioproducts Processing. 2010;8:384-391.
19. Haibullina AI, Sabitov LS, Hayrullin AR, et al. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler. *OP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2018;412:1-6.
20. Lipagina AD. *The use of pulsations for cleaning heat exchangers*: master. dissertation Lipagina A.D. [Place of defense: Kazan State Power Engineering University]. 2019. P. 75.
21. ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, 18.2.0. 2017.

Authors of the publication

Aigul I. Haibullina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Nazif X. Zinnatullin – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Vladimir K. Ilyin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

19 ноября 2020г.

Отредактировано

21 января 2021г.

Принято

21 января 2021г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДО-МАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИСПЕРГАТОРА ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ

А.А. Баубек¹, А.М. Грибков², М.Г. Жумагулов¹, С.А. Глазырин¹, М.В. Долгов^{1*}

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Нур-Султан,
Республика Казахстан

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработать аппарат для волновой обработки обводненного мазута и подготовки водомазутной эмульсии к сжиганию. Представить схему инновационного вихревого горелочного устройства для сжигания водомазутной эмульсии. Провести обзор существующего оборудования для подготовки эмульсии высокого качества. Опровергнуть необходимость в принудительной дегидратации мазута для качественного сжигания в горелочных устройствах. Представить данные по выбору материала для изготовления корпуса диспергатора с учётом требований к коррозионностойкости, а также устойчивости к кавитации и износостойкости. Разработать экспериментальную установку для подготовки водомазутной эмульсии к сжиганию в вихревом горелочном устройстве. Провести анализ с целью выявления соотношений преобразования физико-химических свойств водомазутной эмульсии (седиментационная и агрегативная устойчивость, структурная вязкость) от температуры и объёма в них воды. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи использовались теоретические методы определения вязкости и плотности, а также экспериментально, посредством использования капиллярного вискозиметра, были получены результаты в разных диапазонах изменения температуры подготовки эмульгированного топлива. Применялся метод оценки осветления ВМЭ для оценки седиментационной устойчивости с обязательной выдержкой в стеклянных цилиндрах в статистическом состоянии. РЕЗУЛЬТАТЫ. Приготовление ВМЭ обусловлено нормированием содержания воды. Фактор частичной потери влаги на предприятии во время подготовки эмульсии можно рассматривать как положительное явление побочного обезвоживания. Получены данные по плотности водомазутной эмульсии в зависимости от концентрации воды при температуре 70 °С. Выполнен анализ зависимости стабильности эмульсии на основе мазута М-100 от времени отстоя при 20 °С. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представленный волновой диспергатор экспериментально демонстрирует высокие качественные показатели подготовки ВМЭ. По результатам экспериментов доказано присутствие значительного численного увеличения части с размером 10 мкм, а также проявляется минимальное преобразование частиц дисперсной фазы размером 1,25 мкм в направлении размеров частиц 2,5 мкм. При использовании диспергатора волновой обработки получают стабильные водо-мазутные эмульсии, пригодные для применения в энергетике в качестве топлива.

Ключевые слова: мазут, водомазутная эмульсия, диспергатор, капиллярный вискозиметр.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при финансовой поддержке гранта по теме «Разработка горелочного устройства для сжигания водо-мазутной эмульсии (ВМЭ)», № государственной регистрации 0112РК02283, РК

Для цитирования: Баубек А.А., Грибков А.М., Жумагулов М.Г., Глазырин С.А., Долгов М.В. Исследование водо-мазутной эмульсии при использовании диспергатора волновой обработки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 68-79. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-68-79.

STUDE OF WATER-OIL EMULSION USING WAVE TREATMENT DISPERSANT

AA. Baubek¹, AM. Gribkov², MG. Zhumagulov¹, SA. Glazyrin¹, MV. Dolgov^{1*}

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* To develop an apparatus for wave treatment of water-fuel oil and preparation of water-fuel emulsion for combustion. To present a scheme of an innovative vortex burner device for water-oil emulsion combustion. To review existing equipment for preparation of high quality emulsion. Refute the necessity of forced dehydration of fuel oil for high-quality combustion in burners. To present data on the choice of material for manufacturing the dispersant body, taking into account the requirements for corrosion resistance, as well as resistance to cavitation and wear resistance. To develop an experimental setup for the preparation of water-oil emulsion for combustion in a vortex burner. To conduct an analysis to identify the relationship of transformation of physical and chemical properties of water-oil emulsion (sedimentation and aggregative stability, structural viscosity) from temperature and volume of water in them. *METHODS.* Theoretical methods of viscosity and density determination were used in solving the problem and results were obtained experimentally, by using a capillary viscometer, in different temperature ranges of emulsified fuel preparation. A method was used to assess the clarification of the WFE to evaluate the sedimentation stability, with compulsory conditioning in glass cylinders in a statistical state. *RESULTS.* The preparation of WOE is conditioned by the water content rationing. The factor of partial loss of moisture at the plant during emulsion preparation can be considered as a positive side effect of dewatering. Data on the density of water-oil emulsion depending on the concentration of water at 70 °C has been obtained. The analysis of dependence of stability of emulsion based on fuel oil M-100 from time of settling at 20 °C is made. *CONCLUSION.* The presented wave dispersant experimentally demonstrates a high quality of VME preparation. Experimental results prove the presence of a significant numerical increase of the 10 µm particle size, as well as a minimum conversion of 1.25 µm particles towards the 2.5 µm particle size. The use of wave treatment dispersant results in stable water-oil emulsions suitable for use as fuels in the power industry.

Keywords: fuel oil, water-oil emulsion, dispersant, capillary viscometer.

Acknowledgments: The work on which the article was based was supported by a grant on "Development of a heating device for burning water-oil emulsion (WFE)", state registration number 0112RK02283, RK.

For citation: Baubek AA., Gribkov AM., Zhumagulov MG., Glazyrin SA., Dolgov MV. Stude of water-oil emulsion using wave treatment dispersant. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):68-79. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-68-79.

Введение и литературный обзор

Задача о чистом сжигании углеводородных топлив решается не один десяток лет, в результате чего был накоплен огромный научный и экспериментальный опыт, однако научно-исследовательские работы в этом направлении не прекращаются. Немаловажным параметром остается стехиометрический состав горючей смеси. В результате завихрения потока подачи топлива и окислителя увеличивается длина свободного пробега, а также и их пребывание в канале горелки.

После отделения воды от нефти в осадочные резервуары, часть нефти сбрасывается вместе с водой в виде эмульсии и загрязняет сточные воды. При использовании остатков топлива высокой вязкости в котельных в виде жидкого топлива возникают трудности при приготовлении их к сжиганию. В большинстве эксплуатируемых, проектируемых, промышленных и отопительных котельных подогрев остатков горюче-смазочных материалов, доставляемых в железнодорожных цистернах, обеспечивается с помощью водяного пара, который приводит к содержанию воды в топливе к широкому диапазону изменений (от 5 до 20%). Сжигание вызывает нарушение процесса горения (вплоть до угасание пламени) и уменьшает экономическую эффективность топливных установок. Создание водомазутной эмульсии со стабильной степенью однородности позволяет добиться эффективного сжигания смеси без разделения топлива и воды при увеличении экологических показателей [1].

Вихрь дает возможность прореагировать практически всему топливу. Более того, в результате смешивания топлива и окислителя, с учетом правильной стехиометрии, образуется равномерная горючая смесь, которая будет практически полностью сгорать в канале горелки. Рис. 1 иллюстрирует горелочное устройство, спроектированное для сжигания водомазутной эмульсии (ВМЭ) с переменным содержанием влаги до 30% [2].



Рис. 1. Горелочное устройство для сжигания ВМЭ
Fig.1. Burner device for VME combustion

При организации подготовки топлива для сжигания в мазутных котельных основное значение приобретает обеспечение эффективности и надёжности работы горелочных устройств. Возникает острая проблема с подготовкой топливной смеси к сжиганию, обусловленная многими факторами, наряду с экономическими, которые не удовлетворяют в достаточной мере все необходимые показатели топлива перед непосредственным сжиганием [3].

Для подготовки водо-мазутной эмульсии к сжиганию в вихревой горелке, обеспечивающей устойчивый вихрь на стадии смешения и предварительного возгорания, требуется определение конструкции диспергатора. Основной задачей в работе является исследование реологических и седиментационных свойств водо-мазутной эмульсии.

Данное исследование направлено на изучение свойств ВМЭ, подготовленной посредством использования диспергатора волновой обработки. При подготовке водотопливных эмульсий огромное значение приобретает качественный выбор устройств для приготовления ВМЭ. Существует несколько критериев для определения качества эмульсий. Одним из самых значимых является дисперсность, которая оказывает прямое воздействие на электропроводность, вязкость и устойчивость эмульсии. В массе топлива вода распределяется равномерно и с увеличением количества капель воды в топливе и уменьшением её размеров возрастает дисперсность, что напрямую влияет на качество получаемой эмульсии.

Основываясь на неправильных представлениях о стабильности эмульсий, многие исследователи, как выяснилось, используют термин "смешивание", несмотря на то, что используемая ими технология - это эмульгирование. Хотя смешивание топлива удобно для топлива, имеющего относительно схожую температуру кипения, для топливных смесей с различной температурой кипения следует применять метод эмульгирования, чтобы выгода от микроразрыва могла быть отражена в распылении топлива. Вторичное распыление в результате микро-взрыва эмульгированного топлива и оксигенация топлива отвечают за улучшение процесса сгорания, характеристик и выбросов CO. Скрытая теплота испарения, как выяснилось, отвечает за сокращение выбросов NOx. Скорость уменьшения NOx пропорциональна процентному соотношению количества воды в эмульсии. [4].

Экспериментальные исследования влияния эмульсионных топлив на сгорание, производительность и эмиссию уже проводились ранее. Характеристики эмульсии определялись с помощью оптического электронного микроскопа, проводились испытания на стабильность эмульгирования [5].

Наблюдалось изменение температуры и диаметра капель во времени. Сжигание капель эмульсии было разделено на четыре стадии, при этом характеристики каждой стадии мало варьировались в зависимости от соотношения объема воды [6].

Проблемы образования эмульсии в воде и стабильности эмульгированной нефти во время хранения решались с помощью лазерного дифракционного анализатора размера частиц, анализа изображений и определения объема нефтяной эмульсии [7].

Проведены исследования по установлению влияния параметров неоднородной системы на интенсивность эмульгирования при комплексном воздействии механических

перемешивающих и ультразвуковых колебаний. Использовались методы аналитического обзора результатов ультразвуковой эмульсификации неоднородных систем, аналитическое исследование распространения колебаний ультразвукового диапазона через слой двухкомпонентной эмульсии, экспериментальное исследование эмульсификации несмешивающихся жидкостей при механическом перемешивании в поле действия ультразвуковых колебаний [8].

Принцип работы оборудования для получения эмульсии с высокой степенью качества основывается на явлении кавитации. Одним из возможных вариантов подготовки обводнённого мазута с содержанием влаги до 20% является применение гидродинамических кавитаторов, которые зарекомендовали себя при применении с размером частиц не более 10 мкм в аспекте значительного увеличения скорости горения. Эффект кавитационной обработки является перспективным с точки зрения использования ВМЭ микронного размера. Согласно экспериментальным исследованиям, в небольших частицах эмульсии осуществляется вскипание воды с образованием более мелких элементов за счёт дробления частиц. При сгорании образуется значительно меньшее количество промежуточных продуктов. Анализ технологии выявляет одним из недостатков энергоёмкость осуществления процесса измельчения при подготовки обводнённого мазута [9].

Содержащий твёрдые компоненты обводнённый мазут обладает повышенной температурой вспышки, а также имеет иные отклонения от стандартов, влияет на загрязнение поверхности нагрева, дестабилизирует процесс горения, нарушает полноту сгорания топлива, образует обрывы факела вплоть до аварийной остановки оборудования. Традиционные методы хранения и перекачки подразумевают получение потребителем мазута с превышенным содержанием влаги [10].

В механических аппаратах получают однородные растворы. Также применяются коллоидные мельницы, роторные аппараты, использующие за основу центробежные насосы. Ультразвуковые аппараты используются для измельчения частиц посредством разрушения связи между частицами молекул [11-13].

Главной отличительной особенностью всех вышеперечисленных устройств является сложность конструкции, вследствие чего появляется необходимость дополнительного сервисного обслуживания и в отдельных случаях подключения к постоянным источникам питания.

Недостатки вышеперечисленных диспергаторов ВМЭ устраняются при использовании диспергатора волновой обработки ВМЭ, который подробно описан ниже. Принцип работы диспергатора волновой обработки основан также на эффекте кавитации.

Материалы и методы

Плотность ВМЭ. ВМЭ является композиционной смесью из двух жидкостей различной плотности, поэтому плотность определяется по формуле

$$\rho_{\text{ВМЭ}} = \rho_{\text{м}} \cdot T_{\text{м}} + \rho_{\text{в}} \cdot T_{\text{в}} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ВМЭ}}$ - плотность ВМЭ, кг/м³; $\rho_{\text{м}}, \rho_{\text{в}}$ - соответственно плотность мазута и воды; кг/м³; $T_{\text{м}}, T_{\text{в}}$ - доля в водомазутной эмульсии мазута и воды соответственно.

Определили плотность мазута марки М-100 и воды при температуре 70 °С. При 70 °С $\rho_{\text{м}} = 935,5$ кг/м³; $\rho_{\text{в}} = 971,6$ кг/м³.

Уравнение гидродинамики с вязкостью η через капилляр вискозиметра для определения стационарного течения жидкости (формула Пуазейля):

$$Q = \frac{\pi R^4 p}{8\eta L} \Rightarrow \eta = \frac{\pi R^4 p}{8QL} \quad (2)$$

где Q – протекающее через капилляр капиллярного вискозиметра количество жидкости в единицу времени, м³/с; R – радиус капилляра вискозиметра, м; L – длина капилляра вискозиметра, м; p - разность давлений на концах капилляра капиллярного вискозиметра, Па; η – вязкость жидкости, Па·с;

В приведённом конкретном случае обосновывается использование формулы Пуазейля для ламинарного потока жидкости, когда на границе стенка капилляра

вискозиметра – граница жидкости отсутствует скольжение. При помощи данного уравнения определяется вязкость.

Применялся метод оценки осветления ВМЭ для оценки седиментационной устойчивости с обязательной выдержкой в стеклянных цилиндрах в статистическом состоянии.

Процесс сгорания С в СО и в последствии СО в СО₂ характерен для ВМЭ в силу содержания в нём водяных паров в большом количестве. Возможность использования стоков мазутных резервуаров обусловлена эмульгированием обводнённых жидких углеводородов. Наблюдается стабильное горение ВМЭ при объёмном содержании воды до 50% [14].

На рис. 2 изображены детали диспергатора, на рис. 3 корпус диспергатора и сегнерово колесо, на рис 4. диспергатор в сборе. Конструкция диспергатора представляет аппарат для волновой обработки обводненного мазута, сделанного на заводе в Казахстане.



Рис. 2. Детали диспергатора
Fig.2. Dispersant Details



Рис. 3. Корпус диспергатора и сегнерово колесо
Fig.3. Dispersant housing and Segner wheel



Рис. 4. Диспергатор в сборе
Fig.4. Dispersant assembly

В диспергаторе волновой обработки водомазутная эмульсия гомогенизируется за счет процесса кавитации, поэтому при изготовлении диспергатора необходимо выбрать материал, соответствующий ряду требований:

- корпус и рабочие органы диспергатора должны быть коррозионностойкими;
- устойчивость к кавитации и износостойкость.

Нержавеющие стали хорошо подходят к этим требованиям. На рис. 5 изображены составы для изготовления корпуса диспергатора - сталь марки 03X16H15M3, для сегнерового колеса – сталь марки 12X13.

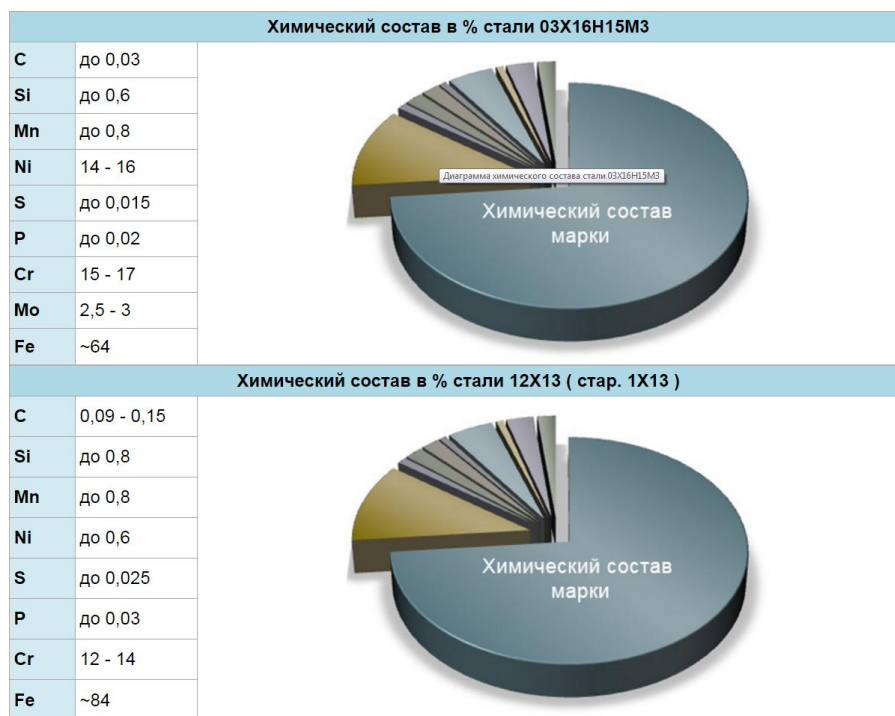


Рис. 5. Составы выбранных сталей
Fig.5. Compositions of selected steels

Стадии сжигания предшествует гомогенизация водотопливной смеси при помощи диспергатора.

Процесс подготовки топлива. Мазут и вода добавляются (соответственно 80 % и 20 %) в бак с топливом. В баке водомазутная смесь нагревается электрическим нагревателем расположенным внутри бака в соответствии с рис. 6.



Рис.6. Бак с топливом и электрическим нагревателем
Fig.6. Fuel tank with electric heater

Для подготовки ВМЭ вентили 1 и 2 переводятся в открытое положение. Запускается насос 4 подачи смеси в диспергатор 3 как показано на рис. 7. Смесь воды и

мазута, проходя через диспергатор, гомогенизируется и получается готовая водомазутная эмульсия. Давление этого цикла отображается на манометре 5 и составляет 2 атм. При циркуляции по циклу ВМЭ прогревается и гомогенизируется. Продолжительность процесса диспергации 10-15 минут. После подготовки и подогрева эмульсии прогревается труба для подачи топлива в горелку. Для этого отключается насос 4 и перекрывается вентиль 1.

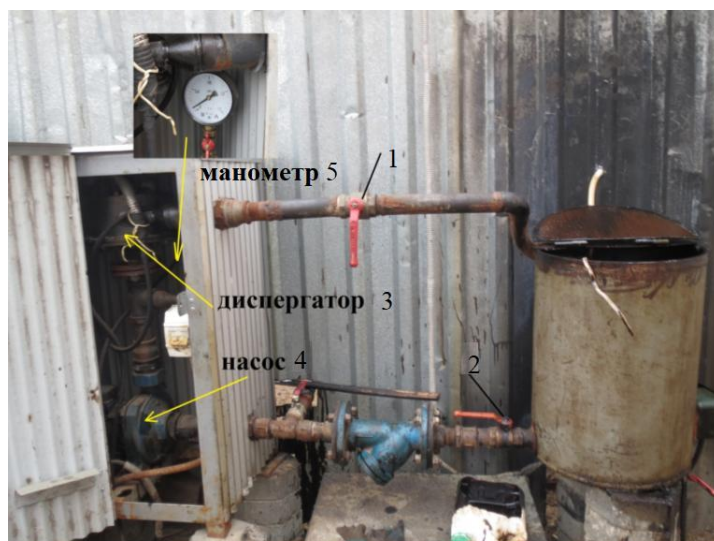


Рис. 7. Подготовка ВМЭ

1, 2 – вентили; 3 – насос; 4 – диспергатор; 5 – манометр

Fig.7. VME preparation: 1, 2- valves, 3- pump, 4- dispersant, 5- pressure gauge

Далее при открытии вентилей 1, 2 и включении насоса 3, прогревается труба подачи топлива приблизительно 3 минуты в соответствии с рис. 8.

После подогрева топлива до нужной температуры и прогрева трубопровода, отключается насос подачи ВМЭ 10, перекрывается вентиль 6.



Рис. 8. Прогрев топливопровода

1, 2 – вентили; 3 – насос

Fig.8. Heating of the fuel line

1, 2—valves, 3- pump

Проведённый анализ выявил ряд изменений зависимостей физико-химических свойств водомазутной эмульсии, к которым относятся агрегативная и седиментационная устойчивость, структурная вязкость, и их зависимость от температуры и содержания воды. Полученные показатели имеют огромное значение для организации эффективного распыла и стабильного горения топлива, а также для оценки эффективности работы непосредственно самого диспергатора.

Результаты и обсуждение

Эксперимент проводился при температуре 80°C для мазута марки М-100. Процентное содержание воды в ВМЭ принималось в диапазоне от 5 до 30 мас.%(5, 10, 15, 20, 30). Мазут для исследований был произведён ТОО «Атырауский нефтеперерабатывающий завод» при использовании запасов месторождения Тенгиз.

Мазут марки М-100 имеет следующие физико-химические показатели, отображённые в таблице 1.

Таблица 1

Наименование показателей	Величина
Массовая доля механических примесей %, не более	1,0
Массовая доля серы, не более	3,5
Зольность, % не более, для мазута малозольного	0,05
Температура застывания, °С, не выше	25
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	110
Теплота сгорания Мазута М-100 (низшая в пересчете на сухое топливо (небраковочная)) кДж/кг, не менее	39900

Опыт проводили с различными концентрациями воды от 5% до 30%. Результаты вычисления представлены в таблице 2 и диаграмме в соответствии с рис. 9.

Таблица 2

Зависимость плотности ВМЭ от концентрации воды при температуре 70 °С

Концентрация воды, %	5%	10%	15%	20%	30%
Плотность ВМЭ, кг/м ³	937,215	939,05	940,625	942,63	946,22

На рис. 9 наглядно видно что, при повышении концентрации воды в смеси плотность ВМЭ увеличивается. Это связано с тем что, плотность воды больше чем плотность мазута.

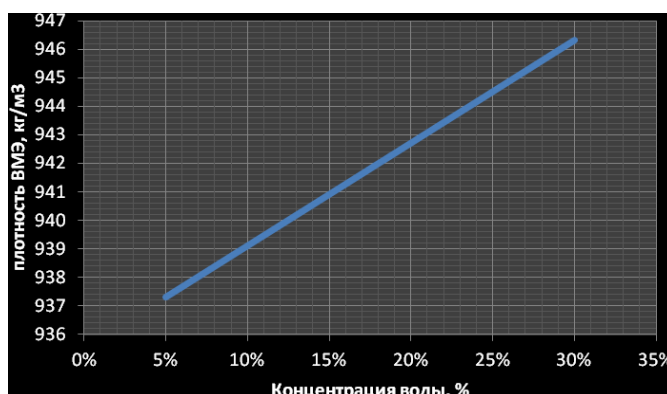


Рис. 9. Зависимость плотности ВМЭ от концентрации воды при температуре 70 °С

Fig.9. Dependence of the VME density on the water concentration at a temperature of 70 °C

На рис. 10 представлено схематическое изображение капиллярного вискозиметра для определения вязкости. В ходе лабораторных исследований применялся капиллярный вискозиметр марки ВПЖ-1. Погрешность измерений данного прибора колеблется в диапазоне 1,5-2,5%.

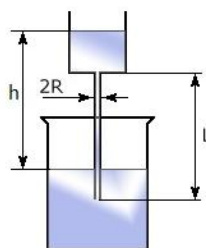


Рис. 10. Капиллярный вискозиметр

Fig.10. Capillary viscometer

Таблица 3

Вязкость ВМЭ в соотношении с концентрацией воды при температуре 70 °С					
Концентрация воды, %	5%	10%	15%	20%	30%
Плотность ВМЭ, кг/м ³	937,215	939,05	940,625	942,63	946,22
Расход ВМЭ, 10 ⁻⁶ м ³ /кг	17,64	16,6	12,72	10,65	8,61
Структурная вязкость ВМЭ, Па·с	0,183	0,193	0,254	0,306	0,371

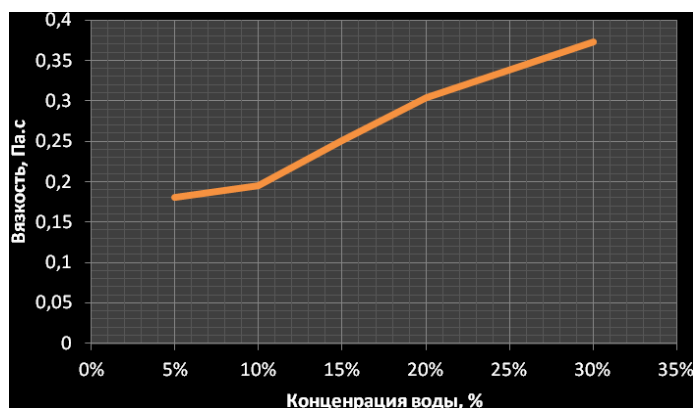


Рис. 11. Вязкости ВМЭ в зависимости от концентрации воды при температуре 70 °С

Fig.11. VME viscosity depending on the water concentration at a temperature of 70 °C

Анализ данных рис. 11 и таблицы 3 отображает возрастание структурной вязкости ВМЭ с увеличением процентного содержания воды и указывает на преобладание над вязкостью исходного мазута. Наблюдается рост вязкости эмульсии от 0,167 Па·с (исходный мазут) до 0,371 Па·с.

Увеличение процентного содержания воды в ВМЭ (выше 30%) вызывает негативные последствия процесса горения [15].

Результаты экспериментального определения структурной вязкости при приготовлении ВМЭ с учётом вариативного процентного содержания воды и при различных значениях температуры приведены в таблице 4.

Таблица 4

Зависимость вязкости ВМЭ на основе мазута М-100 от температуры при различном содержании в них воды

Эмульсия	Структурная вязкость, Па·с при температуре, °С				
	20	40	50	70	80
ВМЭ с 5% H ₂ O	3,04	0,86	0,34	0,19	0,162
ВМЭ с 10% H ₂ O	12,3	1,54	0,76	0,255	0,159
ВМЭ с 20% H ₂ O	12,92	1,98	1,27	0,312	0,211
ВМЭ с 30% H ₂ O	16,74	3,73	1,91	0,377	0,278
ВМЭ с 40% H ₂ O	20,83	6,05	2,49	0,932	0,447

Анализ данных указывает на значительное уменьшение вязкости дисперсной системы в диапазоне температур от 20 до 70 °С. При нагреве воды в диапазоне от 70 до 80 °С величина вязкости снижается незначительно. В качестве примера, вязкость ВМЭ с содержанием воды 30% уменьшается с 0,376 Па·с (при 70 °С) до 0,276 Па·с (при 80 °С). Необходимость дальнейшего увеличения температуры нагрева ВМЭ в диапазоне 90-100 °С обусловлена предотвращением вскипания воды из ВМЭ. Приготовление ВМЭ обусловлено нормированием содержания воды. Фактор частичной потери влаги на предприятии во время подготовки эмульсии можно рассматривать как положительное явление побочного обезвоживания.

Полученные результаты оценки седиментационной устойчивости отображены в таблице 5.

Таблица 5

Отношение стабильности ВМЭ на основе мазута М-100 от времени отстоя при 20°C

Исходное содержание воды в ВМЭ, % мас.	Концентрация воды в ВМЭ в верхнем слое, % мас.				
	1 час	2 часа	5 часов	8 часов	сутки
5	3,2	3,2	3,43	3,99	4,5
10	4,3	4,41	5,0	5,23	6
15	5,13	5,25	5,5	6,09	6,7
20	5,22	5,21	5,67	6,4	8
30	8,9	11	15,02	19	28,3

Заключение

Наиболее оптимальным процентным содержанием является соотношение мазута – 80% и воды – 20% с точки зрения термического расщепления воды Н и ОН и частичного последующего горения атомарного водорода с выделением теплоты.

Волновой диспергатор экспериментально демонстрирует высокие качественные показатели подготовки ВМЭ. Полученная ВМЭ, с содержанием воды в диапазоне 5-30%, стабильна в течении суток в интервале температур. При помощи диспергатора волновой обработки получают стабильные ВМЭ, при стандартных условиях подготовленное топливо хранится в расходном резервуаре не более суток, поэтому получаемая по представленной технологии ВМЭ применима для нужд энергетики в обширном диапазоне применения. ВМЭ выступает в качестве дисперсной системы с высокой агрегативной устойчивостью. Присутствует значительное численное увеличение части с размером 10 мкм, а также проявляется минимальное преобразование частиц дисперсной фазы размером 1,25 мкм в направлении размеров частиц 2,5 мкм.

Литература

1. Baubek A.A., Zhumagulov M.G., Kartjanov N.R. et al. Experimental test of Water-Oil Emulsion Combustion // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020. E3S Web of Conferences 178, 01012. 2020.
2. Baubek A.A., Baubek N. Device for burning fuel [Electronic resource], European Patent no. 2864700. 2016. Available at: <https://data.epo.org/gpi/EP2864700B1-DEVICE-FOR-BURNING-FUEL>.
3. Баубек А.А., Жумагулов М.Г., Картджанов Н.Р. Экспериментальные исследования вредных выбросов при сжигании водо-мазутной эмульсии в инновационной вихревой горелке // IV Международная научно – практическая конференция на тему: «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения»; 17 марта 2016г. Астана, 2007. С.73-80.
4. Hagos F.Y., Ali O.M., Mamat R. et al. Effect of emulsification and blending on the oxygenation and substitution of diesel fuel for compression ignition engine // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. V. 75. N5 pp. 1281-1294.
5. Tan Y.H., Abdullah M.O., Nolasco-Hipolito C. et al. Engine performance and emissions characteristics of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol emulsions // Energy Conversion and Management, 2017. V. 132, N2. pp. 54-64.
6. Kim H., Baek, S.W. Combustion of a single emulsion fuel droplet in a rapid compression machine // Energy, 2016. V. 106. N3 pp. 422-430.
7. Laitinen O., Ojala J., Sirviö, J.A., et al. Sustainable stabilization of oil in water emulsions by cellulose nanocrystals synthesized from deep eutectic solvents // Cellulose, 2017. V.24.N4. pp. 1679-1689.
8. Afanasenko V.G., Kulakov P.A., Boev E.V., et al. Optimization of ultrasound emulsion under mechanical mixing // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2020. V. 331.N4. pp. 148-155.
9. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Маргулис С.М., Касимова Л.И. ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЫГОРАНИЕ ЧАСТИЦ МАЗУТА В ТОПКАХ КОТЛОВ. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018;20(9-10):52-59.
10. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Румынский АА. Влияние добавки влаги в топку на интенсивность лучистого теплообмена // Теплоэнергетика. 1992. № 1. С. 41–44.
11. Корягин В.А. Сжигание водотопливных эмульсий и снижение вредных выбросов. С-Пб.: Недра, 1995. 367 с.

12. Шерман Ф. Эмульсии. Перевод с английского под ред. А.А. Абрамзона. Л.: Химия, 1972. 448 с.

13. Промтов М.А., Червяков В.М., Воробьев Ю.В. Приготовление эмульсии в роторном аппарате // Научно-технич. информ. сб. статей. М.:ВНИИСЭНТИ. 1991. №3. С. 47-50.

14. Геллер С.В. Приготовление водомазутных эмульсий посредством волновой диспергации. Патент РФ №2347153. 20.02.2009. №4. 16.

15. Зверева Э.Р., Фарахов Т.М. Энергоресурсосберегающие технологии и аппараты ТЭС при работе на мазутах. М.: «Теплотехник», 2012. 181 с.

Авторы публикации

Баубек Аскар Аношевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Организация перевозок, движения и эксплуатация транспорта», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва.

Грибков Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

Жумагулов Михаил Григорьевич – доктор, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва.

Глазырин Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва.

Долгов Максим Викторович – докторант кафедры «Теплоэнергетика», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва.

References

1. Baubek AA, Zhumagulov MG, Kartjanov NR. et al. *Experimental test of Water-Oil Emulsion Combustion*. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020. E3S Web of Conferences 178, 01012. 2020. doi.org/10.1051/e3sconf/202017801012

2. Baubek AA, Baubek N. *Device for burning fuel* [Electronic resource], European Patent no. 2864700. 2016. Available at: <https://data.epo.org/gpi/EP2864700B1-DEVICE-FOR-BURNING-FUEL>.

3. Baubek AA, Zhumagulov MG, Kartjanov NR. Eksperimentalnye issledovaniya vrednyh vybrosov pri chhuganii vodo-mazutnoi emulsii v innovacionnoi vihvvoi gorelke. IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya na temu: «Aktualnye problem transporta i energetiki: puti ih innovacionnogo resheniya»; 17 March 2016. Astana, 2007. pp.73-80.

4. Hagos FY, Ali OM, Mamat R et al. Effect of emulsification and blending on the oxygenation and substitution of diesel fuel for compression ignition engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017;75(5):1281-1294. doi:10.1016/j.rser.2016.11.113.

5. Tan YH, Abdullah MO, Nolasco-Hipolito C et al. Engine performance and emissions characteristics of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol emulsions. *Energy Conversion and Management*, 2017;132(2):54-64. doi:10.1016/j.enconman.2016.11.013.

6. Kim H, Baek SW. Combustion of a single emulsion fuel droplet in a rapid compression machine. *Energy*. 2016;106(3):422-430. doi:10.1016/j.energy.2016.03.006.

7. Laitinen O, Ojala J, Sirviö JA, et al. Sustainable stabilization of oil in water emulsions by cellulose nanocrystals synthesized from deep eutectic solvents. *Cellulose*, 2017;24(4):1679-1689. doi:10.1007/s10570-017-1226-9.

8. Afanasenko VG, Kulakov PA, Boev EV, et al. Optimization of ultrasound emulsion under mechanical mixing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2020; 331(4):148-155. doi:10.18799/24131830/2020/4/2602.

9. Taymarov MA, Akhmetova RV, Margulis SM, et al. The effect of cavitation treatment on the extinguishing of particles of oils in fuel boilers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(9-10):52-59. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-52-59>.

10. Kormilicyn VI, Lyskov MG, Rumynskiy AA. Vliyanie dobavki vlagi v topku na intensivnost luchistogo teploobmena. *Teploenergetika*. 1992;(1):41-44.

11. Koryagin VA. *Szhiganie vodotoplivnyh emulsii i snizhenie vrednyh vybrosov*. Saint Petersburg: Nedra; 1995.

12. Sherman F. *Emul'sii. Perevod s angliyskogo god red. A.A. Abramzona*. L.: Khimiya; 1972.
13. Promptov MA, Chervyakov VM, Vorobyev VM. Prigotovlenie emulsii v rotnom apparate. *Nauchno-tehnicheskii informacionnyi sbornik statei*. Moscow.: VNIISNTI. 1991;(3):47-50.
14. Geller SV. Prigotovlenie vodomazutnyh emulsii posredstvom volnovoi dispergacii. Patent RUS №2347153. 20.02.2009. №4. 16.
15. Zvereva ER, Farahov TM. *Energoresursoberegayushie tehnologii i apparaty TES pri rabote na mazutah*. Moscow: «Teplotekhnika»; 2012.

Authors of the publication

Askar A. Baubek – L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan.

Aleksandr M. Gribkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Michael G. Zhumagulov – L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan.

Sergei A. Glazyrin – L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan.

Maxim V. Dolgov – L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan. Email: maxwellhousebest@yandex.ru.

Получено

02 февраля 2021г.

Отредактировано

03 марта 2021 г.

Принято

04 марта 2021г.



О РАЗРАБОТКЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛИЗОВАННОГО ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА

М.А. Драко¹, С.М. Барайшук², И.А. Павлович²

¹РУП "Белэнергосетпроект", г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск,
Республика Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5267-9110>, drako.mikhail@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Обосновать целесообразность совершенствования методологии выполнения заземляющих устройств. Исследовать влияние минеральной проводящей смеси на коэффициент сезонности. Проанализировать результаты экспериментальных исследований. Оценить снижение сопротивления тестового заземляющего устройства по отношению к контрольному. Предложить эффективные технические решения для снижения значения сопротивления заземляющих устройств. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи проведен ряд натурных экспериментов по измерению значений сопротивлений заземляющих устройств экспериментальных заземлителей, после обработки смесью околоэлектродного объема грунта для оптимизации сопротивления заземлителя. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработан состав смеси для нормализации (уменьшения) удельного электрического сопротивления грунта, содержащей гидростабилизирующие добавки и низкодиспергированные проводящие вещества. Предложены аналитические выражения для оценки эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта с учетом замещения части грунта минеральной проводящей смесью. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Применение смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила наиболее эффективно при использовании совместно с заземлителями, глубина заложения которых меньше глубины промерзания грунта, то есть находящимися в слоях грунта с наибольшими сезонными колебаниями, и будет расти при увеличении площади контакта таких заземлителей с грунтом, обработанным гидролизированным полиакрилонитрилом. Дополнительное уменьшения коэффициента сезонности для вертикальных составных заземлителей, по-видимому, обусловлено влиянием смеси на их части, смонтированные вблизи поверхности грунта. Применение комплексных смесей, содержащих, помимо гидростабилизирующих добавок, также и низко диспергированные проводящие вещества, позволяет до трех раз уменьшить сопротивление заземляющих устройств в сравнении с контрольными, сгладить сезонные колебания сопротивления ЗУ и капитальные затраты на монтаж заземляющих устройств путем уменьшения количества электродов и размеров территории, на которой они располагаются.

Ключевые слова: электрические станции и электроэнергетические системы, заземляющее устройство, удельное электрическое сопротивление грунта, заземлитель, околоэлектродное пространство, гидростабилизирующие вещества, коэффициент сезонности.

Для цитирования: Драко М.А., Барайшук С.М., Павлович И.А. О разработке смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунт // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 80-92. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92.

COMPOUND MIXTURES BASED ON HYDROLYZED POLYACRYLONITRILE REDUCING SOIL ELECTRICAL RESISTIVITY

MA. Drako¹, SM. Baraishuk², IA. Pavlovich²

¹RUE Belenergosetprojekt, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk,
Republic of Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5267-9110>, drako.mikhail@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The purpose of the article is to define the reasons to improve the system of grounding devices design. Author studies technical decisions that reduce grounding resistance values. Results are given researches how a mineral conductive mixture, that normalizes grounding, influences a seasonal coefficient. Analysed the results of the experimental surveys. Also evaluates a test grounding device's resistance decrease compared to the resistance decrease of a control grounding device. *METHODS.* While solving the above problem, a number of field experiments were carried out to measure the resistance values of experimental circuit grounding devices after their near-electrode soil space had been treated with the mixture that improves the resistance of a grounding wire. *RESULTS.* The composition of the mixture that normalizes (reduces) soil electrical resistivity has been developed, it has contained hydro-stabilizing and low-dispersed conducting additives. There has been proposed the analytical expressions to evaluate equivalent soil electrical resistivity values after a portion of soil had been submitted by the mineral conducting mixture. *CONCLUSION.* The use of the mixtures based on hydrolyzed polyacrylonitrile is most effective together with the grounding wires buried in soil no deeper than the soil freezing depth that is located in the soil layers with maximum seasonal fluctuations, and will increase with the increase of the contact area of such grounding wires with the soil treated with hydrolyzed polyacrylonitrile. Additional decrease of a seasonal coefficient for the vertical compound grounding wires apparently is due to the mixture influencing their parts mounded near the ground surface. The use of complex mixtures containing both hydro-stabilizing additives and low-dispersed conducting substances allows up to three times decrease of the resistance values of a grounding device compared to a control grounding device, it allows to even seasonal fluctuation of resistance of a grounding device, and to decrease mounting capital investment for a grounding device by means of the decrease of the number of the electrodes and the territory on which they are located.

Key words: *electrical stations, electrical energy systems, grounding device, soil electrical resistivity, grounding wire, near-electrode soil space, hydro-stabilizing substances, seasonal coefficient.*

For citation: Drako MA, Baraishuk SM, Pavlovich IA. Compound mixtures based on hydrolyzed Polyacrylonitrile reducing soil electrical resistivity. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):80-92. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92.

Введение и литературный обзор

Заземлением называется преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством [1]. В энергетике заземление используется для защиты от опасного действия электрического тока (защитное заземление), а также для обеспечения нормальной работы электроустановки (функциональное заземление) [2]. Защитные заземления снижают до безопасной величины напряжение относительно земли на металлических частях электроустановки, которые не находятся под напряжением, но могут оказаться под ним вследствие повреждения изоляции электрического оборудования. Защитному заземлению подлежат все металлические наружные части и каркасы электротехнического оборудования.

Наибольшее число заземляющих устройств энергетических систем выполняется в виде соединенных различным образом неизолированных стальных элементов, находящихся в контакте с землёй и предназначенных для стекания тока в землю. Их совокупность называется заземляющим устройством. Характерной особенностью таких заземляющих устройств является то, что поперечные размеры отдельных элементов, как правило, существенно меньше их длины. Это позволяет при расчете основных электрических параметров (сопротивление растеканию, распределение потенциала и напряженности поля в среде) пренебречь неравномерностью распределения плотности тока по образующей поперечного сечения элементов [3].

При проектировании заземляющих устройств определяющую роль играют нормированное значение сопротивления заземления, а также электропроводность грунтов на площадке размещения заземляющих устройств. Электрические свойства грунтов, в свою очередь, находятся в прямой зависимости от количества в них хорошо проводящих минералов, пористости, влажности грунта (уровня залегания грунтовых вод), сезонности (климатических условий места расположения заземляющих устройств) [4].

Академиком П.П. Роговым были проведены исследования и составлена схематическая карта территориального расположения грунтов Республики Беларусь, на основании которой можно сделать следующие выводы:

– водопроницаемость в суглинистых местах очень мала, а в супесчаных и особенно в песчаных сильно возрастает;

– водоудерживающая способность грунтов различна – суглинистые грунты удерживают до 91,5% воды, а песчаные только 42,7% (супесчаные грунты занимают промежуточные значения – 66,5%).

На основании результатов указанных исследований предварительно можно аналитически оценить необходимый объем геофизических изысканий при проектировании заземляющего устройства электроустановки, которое при минимальных затратах на ее сооружение в любое время года должно удовлетворять требованиям обеспечения безопасности людей и животных, защиты силовоточных и слаботочных электроустановок, а также надежности обеспечения их эксплуатационных режимов работы и грозозащиты и обеспечивать нормируемые значения электрических параметров заземляющих устройств в течение нормативного срока службы электроустановки.

Проблема сопоставления разных, а по сути уникальных геофизических условий в местах размещения электроустановок, по показателям свойств и характеристик постоянно возникает при решении практических задач обеспечения нормируемых показателей заземляющих устройств, причины и физического и морального износа которых выделены в [5].

Интерес представляет влияние специальных минеральных проводящих смесей и других технических решений на параметры заземляющего устройства [6–10]. Однако, ранее не рассматривался способ стабилизации влажности заземлителя в местах заложения заземляющих устройств с применением гидрогелей. В работе предложен состав смеси для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта, содержащей гидростабилизирующие добавки и низкодиспергированные проводящие вещества. Проведена оценка эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта с учетом замещения части грунта минеральной проводящей смесью. Показана возможность применения комплексных смесей, которая позволяет до трех раз уменьшить сопротивление заземляющих устройств, сгладить сезонные колебания сопротивления заземляющих устройств, за счет уменьшения коэффициента сезонности, и капитальные затраты на монтаж заземляющих устройств путем уменьшения количества электродов и размеров территории, на которой они располагаются.

Литературный обзор

Согласно зарубежной практике, удельное сопротивление почвы может быть уменьшено введением в около электродное пространство хлорида натрия, сульфата магния, сульфата меди и хлорида кальция или аналогичных веществ [6–7]. Чаще всего используются поваренная соль и сульфат магния. Химические вещества обычно наносят, помещая их в круглую канавку вокруг электрода таким образом, чтобы предотвратить прямой контакт с электродом. Такая обработка должна периодически обновляться из-за вымывания в зависимости от способа химической обработки и характеристик почвы, однако данный способ отрицательно сказывается на защите заземляющих электродов от коррозии [8].

Также, широко распространено использование заземляющих электродов в бетонной оболочке. Бетон ниже уровня земли представляет собой полупроводниковую среду с удельным сопротивлением около 30 Ом·м при 20 °С или несколько ниже, чем у среднего суглинка [4]. Использование для анодного заземлителя токопроводящей бетонной оболочки, содержащей песок, препарат коллоидно-графитовый, цемент, шунгитовую крошку, нитрофоску в указанных количествах позволяет обеспечить достаточную электрическую проводимость и срок действия устройства [9]. В Российской Федерации получило распространение использование минерального активатора грунта, представляющего собой полусухой электролит или электропроводящий гидрогель, увеличивающий площадь токоотдачи, имеющий низкое сопротивление растеканию тока электрод – грунт, использование которого возможно и достаточно эффективно лишь совместно с полами, перфорированными заземляющими электродами устойчивыми к коррозии [10].

При комбинированной защите от коррозии и как самостоятельное антикоррозионное мероприятие часто используют однослойные или многослойные покрытия, изготовленные из различных искусственных материалов, среди которых в [11] выделены термореактивные и термопластичные полимеры или их комбинации как между собой, так и с другими

покрытиями. Однако такие покрытия могут применяться для систем заземления только в случае, если они будут обладать достаточной проводимостью.

При взаимодействии с грунтом наполнение электродов диффундирует в грунт через перфорацию в стенках электрода, также образуя электролит. Эффективным способом оценки коррозионного состояния оборудования является коррозионный мониторинг – система наблюдений и прогнозирования коррозионного состояния объекта с целью получения своевременной информации о возможных коррозионных отказах, а также для обоснования необходимости и выбора методов защиты металлов от коррозии [12].

Для Республики Беларусь нехарактерны грунты с высокой и повышенной коррозионной активностью. Значения удельного электрического сопротивления грунтов идентичных типов во всех областях республики отличаются незначительно и могут быть приняты усредненными. В других грунтах, за исключением песка, ожидаемое удельное электрическое сопротивление не превышает 600 Ом·м [8].

Сечение вертикальных электродов заземляющих устройств выбирается только по их механической прочности и коррозионной стойкости, вопросы коррозии заземлителей электроустановок Белорусской энергосистемы детально рассмотрены в [8]. Опыт обследования металлических конструкций воздушных линий электропередачи и подстанций, изложенный в [13], свидетельствуют о том, что в климатических условиях Беларуси наибольшие коррозионные поражения элементов наблюдаются в уровне земли, а также на участке 0,2 м выше и ниже уровня земли. В целях сохранения работоспособности и долговечности заземляющих проводников электрооборудования необходимо своевременное выполнение мероприятий по их антикоррозийной защите [14].

С учетом максимальной глубины промерзания грунта в Беларуси (порядка 1,8 м) при длине вертикального электрода равной, 5 м, его активная часть по отводу в землю тока составляет только 3,2 м. Однако анализ приведенных в [15] результатов расчетов различными методами глубины промерзания для одной и той же местности, для одного и того же типа грунта показывает, что разность между максимальным и минимальным значениями глубины промерзания составляет более 50%, что не учитывается в практике проектирования заземляющих устройств при выборе длины вертикальных электродов. Для условий Беларуси средняя скорость промерзания грунтов составляет 1,3–2,1 см/сут, а оттаивания – 2,3–4 см/сут и зависит от типа грунта и степени его уплотнения. Если снежный покров образуется до промерзания, то скорость промерзания уменьшается в 2 раза по сравнению с промерзанием грунта при отсутствии снежного покрова.

Анализ результатов геоэлектрического разреза верхних слоёв земли на энергетических объектах Белорусской энергосистемы показал, что грунты с повышенной электропроводимостью и удельным электрическим сопротивлением до 100 Ом·м в большинстве случаев располагаются на глубине более 5 м. Поэтому в некоторых случаях для достижения нормированных величин электрических параметров заземляющих устройств требуется большое количество вертикальных электродов и связанная с этим значительная дополнительная площадь под искусственный заземлитель.

Нерациональное использование стали при традиционном выполнении системы заземления, как правило, ведет к излишним капитальным затратам. При этом электробезопасность и защищенность электрооборудования от грозовых и внутренних перенапряжений не увеличиваются.

Указанную проблему, связанную с вертикальными электродами, можно решить путем применения глубинных вертикальных заземлителей (составных или из цельных труб). Целесообразность применения таких заземлителей в электросетевом строительстве обосновывается двумя основными факторами:

- заземлители могут достигать нижележащих слоев земли с низким удельным сопротивлением, что способствует снижению их сопротивления;
- сезонный коэффициент таких заземлителей при их длине 10 м и выше приблизительно равен 1.

При проектировании, монтаже и обслуживании заземляющих устройств в грунтах, имеющих высокое электрическое сопротивление, для снижения значения сопротивления заземления рекомендуется использовать ряд технических решений, одним из которых является применение обработки грунта веществами и смесями, неагрессивными к материалу заземлителя, для снижения сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве [16]. Для обеспечения необходимого контакта составных глубинных заземлителей с землей по всей его длине в белорусских технических нормативных правовых актах рекомендовано проводить заливку в процессе погружения электрода,

например глинистым или другим проводящим раствором, не подлежащим вымыванию в процессе эксплуатации.

Одним из перспективных методов уменьшения электрического сопротивления грунта на площадке монтажа ЗУ, а значит и сопротивления самого искусственного заземлителя в целом, является обработка грунта путем введения специальных составов с низким удельным сопротивлением, неагрессивных к материалу заземлителя, стабилизирующих влажность [16, 17] непосредственно в околоэлектродный объем грунта. В таком случае обеспечивается как уменьшение температуры замерзания воды, находящейся в грунте в несвязанном виде, за счет ее связывания, так и снижение его удельного сопротивления, за счет формирования связанных электролитических растворов.

Анализ, ранее исследованных зависимостей сопротивления почвы от влажности, описанных в частности в [18], и экспериментальные исследования свойств гидросорбирующих агентов, проведенные в [16, 19–20], показывают, что стабилизация влажности грунта по величине 12–16 % в массовом соотношении является оптимальной, дальнейшее увеличение влажности уже не приводит, к сколь либо значительному снижению сопротивления. Исследование динамики транспортных свойств гидрогелей проведенное в [18, 21–22], также показало принципиальную возможность использовать гидролизированный полиакрилонитрил в качестве гелеобразного (полусухого) электролита, вследствие процессов транспортировки и перераспределения ионных оснований, адсорбированных с водным раствором, внутри состава [22–23], что также подтвердило возможность использовать гидролизированный полиакрилонитрил в качестве гелеобразного (полусухого) электролита, вследствие процессов транспортировки и перераспределения ионных оснований, адсорбированных с водным раствором, внутри состава. На основании этих данных авторы исследовали спектр составов смеси, содержащей гидростабилизирующие добавки, бентонит, проводящие добавки, и зольные добавки. Разработан состав смеси, содержащей гидростабилизирующие добавки, также и низко диспергированные, углеродсодержащие проводящие вещества.

Введение проводящих смесей с углеродосодержащими порошками эффективно при снижении высоких удельных электрических сопротивлений грунта (порядка 400–600 Ом·м) и малоэффективно при величинах сопротивлений менее 100 Ом·м, в таком случае он может давать сколь либо заметный эффект только в сочетании с гидростабилизирующими веществами, например гидролизированным полиакрилонитрилом.

Материалы и методы

При проведении натурных экспериментов на супесчаном грунте были смонтированы заземляющие устройства (заземлители), представляющие собой вертикальный составной электрод из оцинкованной стали диаметром 16 мм длиной 3 м и горизонтальный фрагмент соединительной полосы 4х50 мм той же длины. Контрольные заземлители были смонтированы без применения каких-либо добавок. В околоэлектродном объеме грунта экспериментальных заземлителей проведена обработка смесью для оптимизации сопротивления заземлителя, или отдельными ее компонентами, стабилизирующими влажность или улучшающими проводимость.

Систематические измерения значений сопротивления заземляющих устройств выполнялись более трех лет четырех проводным методом при помощи измерителя ИС-10 при разных значениях температуры и влажности окружающей среды и грунта. Кроме того, методом вертикального электрического зондирования проведен цикл измерений удельного электрического сопротивления грунта в месте заложения экспериментальных и контрольных заземлителей.

Измерения удельного сопротивления грунта в зависимости от количества введенного гидрогеля проводились по методике аналогичной описанной в [24] и в соответствии с методикой определения ρ грунта, изложенной в ГОСТ 9.602.89 Единой системы защиты от коррозии и старения. Установка изготовлена из полипропиленовых труб. Измерительные электроды выполнены из пластин нержавеющей стали размером 50х75 мм, длина проводящего слоя грунта составляет 2,1 м. Общий объем размещаемого в установке грунта равен 0,08 м³. Гидрогель на основе гидролизованного полиакрилонитрила помещали в емкость с водой до полного набухания, после чего смешивали с грунтом и заполняли экспериментальную установку, где протекал переменный ток частотой 50 Гц. Результаты измерений усреднялись, причем величина значений напряжения подбиралась таким образом, чтобы можно было измерить ток с погрешностью не более 10 %. Погрешность измерительных приборов при измерении тока и напряжения составляла не более 1 %.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены результаты измерений удельного сопротивления смеси грунта с гидролизированным полиакрилонитрилом в различных пропорциях.

Как видно из графика, представленного на рисунке 1, при внесении гидрогелей полученных набуханием гидролизованного полиакрилонитрила сухой массой более 1,3–1,5 % от массы грунта происходит стабилизация влажности, и дальнейшее увеличение концентрации не приводит к уменьшению удельного сопротивления грунта, что косвенно указывает на получение оптимальной влажности грунта, что хорошо согласовывается с результатами, представленными в [18].

Результаты экспериментальных исследований сопротивления контрольного заземлителя (красная кривая), а также заземлителя с разрабатываемым составом смеси (зеленая кривая) приведены на рис. 2. Также проанализирована динамика измерения сопротивления заземлителя, обработанного единственным компонентом: гидролизированным полиакрилонитрилом [16, 20] (черная кривая), являющимся нетоксичным, незагрязняющим окружающую среду и применяемым даже в сельскохозяйственном производстве веществом.

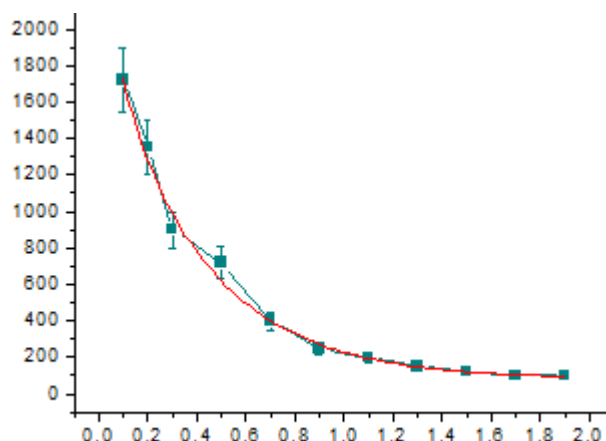


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления грунта от процента введения геля на основе гидролизованного полиакрилонитрила

Fig.1. The dependence of the soil resistivity on the percentage of gel introduction based on hydrolyzed polyacrylonitrile

Отметим, что гидролизированный полиакрилонитрил – основной стабилизирующий влажность компонент смеси.

Из полученных результатов измерений можно сделать вывод, что наименьшее значение сопротивления имеет заземляющее устройство, околоэлектродное пространство которого обработано экспериментальной смесью для снижения сопротивления растеканию заземляющих устройств. Применение смесей позволяет не только уменьшить колебания сопротивления растеканию заземлителя, но и уменьшить его сопротивление в сравнении с контрольным заземлителем.

Комплексное применение смеси снижает температуру замерзания грунта на 4 °С, что дает возможность использовать более высокие средние многолетние низшие температуры при определении климатической зоны площадки месторасположения проектируемого электрооборудования.

Исследования [16] показали, что влияние на снижение электрического сопротивления можно разделить на два фактора: изменение коэффициента сезонности и уменьшение удельного сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве, что позволяет внести корректировки в расчеты сопротивления заземлителя при применении смесей при монтаже заземляющих устройств на основе алгоритмов расчета сопротивления для двухслойной земли.

На основании работ [25, 26] и с учетом экспериментальных данных авторами были получены нижеприведенные эмпирические выражения. Эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта с учетом замещения части грунта смесью можно определить, используя аналитическое выражение, полученное на основе экспериментальных данных для однослойного (1) и двухслойного грунта (2):

$$\rho_{\text{экв}} = \Psi \cdot (\rho_{\text{грунта}} \cdot e^{-1,3/P} + 20 / e^{4/P}), \quad (1)$$

$$\rho_{\text{экв}} = \Psi \left(\frac{\rho_{1\text{грунта}} \cdot \rho_{2\text{грунта}} \cdot l}{\left(\rho_{1\text{грунта}} (l - H + t_{\text{тр}}) + \rho_{2\text{грунта}} (H - t_{\text{тр}}) \right)} e^{-1,3/P} + 20 / e^{4/P} \right), \quad (2)$$

где $\rho_{\text{экв}}$ – искомое эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м; $\rho_{\text{грунта}}$ – полученное в результате натурных измерений удельное сопротивление грунта, Ом·м; Ψ – коэффициент сезонности; H – глубина верхнего слоя грунта, м; $t_{\text{тр}}$ – глубина траншеи, м; l – длина вертикального заземлителя, м; P – периметр сечения замещающей смеси, м.

Экспериментально проверялась адекватность разработанных эмпирических выражений (1) и (2) для периметров замещения до 10 м.

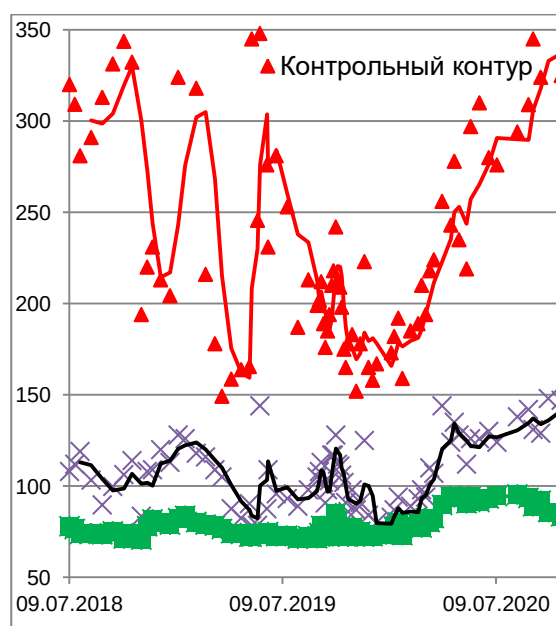


Рис. 2 График сопротивления контрольного заземляющего устройства (красная кривая), заземлителя, обработанного гидролизированным полиакрилонитрилом (синяя кривая), и заземлителя, обработанного смесью (зеленая кривая)

Fig.2. Graph of the resistance of the control earthing device (red curve), the earthing device treated with hydrolyzed polyacrylonitrile (blue curve), and the earthing device treated with a mixture (green curve)

Необходимо отметить, что развитие теории и методов расчета заземляющих устройств в зависимости от принятой модели электрической структуры земли еще в 1981 году Якобс А.И. условно разбил на три этапа:

1. До 1954 г. землю представляли в виде однородного проводящего полупространства (“однородная земля”).

2. После опубликования исследований Бургсдорфа В.В. в 1954 г. был произведен переход к представлению новой модели земли в виде двухслойного проводящего полупространства (“двухслойная земля”) и изложен метод расчета простых (одиночных) заземлителей: вертикального и горизонтального прямолинейных и в виде кольца.

Дальнейшее развитие теории привело к созданию строгого метода расчета сложных (многоэлементных) заземлителей в двухслойной земле. Данное исследование осуществлялось методом физического моделирования для некоторых видов неоднородности, а также на основании обобщения аналитических расчетов на ЭВМ. Ворониной А.А. в 1969 г. были получены соотношения для расчета сопротивления сеток с вертикальными электродами и расчета напряжения прикосновения в центре угловой ячейки сеток с с вертикальными электродами.

3. Однако расхождения между расчетными и экспериментальными значениями сопротивления сложных заземлителей и напряжения прикосновения на территории трансформаторных подстанций и открытых распределительных устройств хотя и значительно уменьшились, но продолжали оставаться заметными (до 30 %, а в отдельных

случаях и до 50 %). Проведенный Якобсом А.И. анализ подтвердил, что причина заключается в весьма грубом приближении двухслойной модели земли к действительной электрической структуре ее верхнего слоя. В связи с чем, учеными после 1970 г. рассматривались три различных пути дальнейшего повышения точности расчета сложных заземлителей:

- поиски метода эквивалентной замены многослойной электрической структуры земли двухслойной моделью;
- непосредственное использование для расчета кривых вертикального электрического зондирования) без их предварительной интерпретации
- разработка метода расчета заземлителей в многослойной земле.

В случае использования вертикального составного заземлителя круглого сечения, заглубленного в грунт (рис. 3) в условиях обработки смесью околоэлектродного пространства, уравнение для расчета сопротивления заземлителя примет вид:

$$R_B = \frac{\rho_{\text{экв}}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d_{\text{экв}}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+1}{4t-1} \right), \quad (3)$$

где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр заземлителя, м, определяемый по (4).

t – расстояние до середины длины вертикального стержня от поверхности грунта, м.

Данная поправка корректирует вклад изменения удельного электрического сопротивления грунта в околоэлектродном слое (объема возникающего при прохождении соединительных муфт в грунте) при замещении грунта смесью с более низким удельным сопротивлением.

$$d_{\text{экв}} = d_{\text{зазем}} \left(1 + \frac{(d_{\text{муфты}} - d_{\text{зазем}})}{d_{\text{зазем}}} \cdot \frac{\rho_{\text{экв}}}{\rho_{\text{грунта_изм}}} \right), \quad (4)$$

где $d_{\text{зазем}}$ – диаметр стержня составного заземлителя диаметр заземлителя, м;
 $d_{\text{муфты}}$ – диаметр соединительной муфты, м; $\rho_{\text{грунта_изм}}$ – измеренное удельное сопротивление грунта, Ом·м.

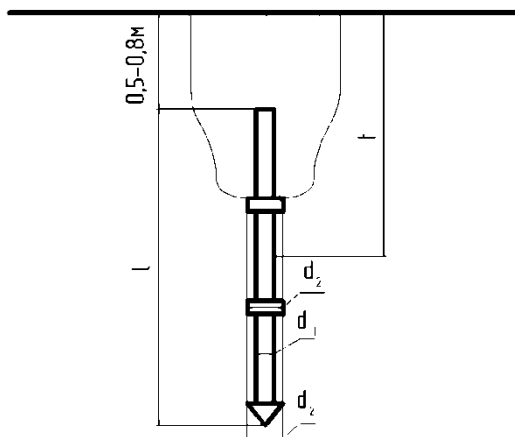


Рис. 3 Схема размещения в грунте вертикального составного заземлителя

Fig.3. Layout of the vertical composite earthing device in the ground

Предложенные выражения для оценки эквивалентного удельного электрического сопротивление грунта с учетом замещения части грунта минеральной проводящей смесью. Формулы являются обобщением результатов расчетов, и измерений сопротивления экспериментальных заземляющих устройств. Сходимость параметров заземляющего устройства полученных при расчетах и реально полученных зависит от точности исходных данных по электрическим характеристикам грунта, которые определяются методом вертикального электрического зондирования. Погрешности между расчетными значениями сопротивления заземляющих устройств, полученными в нашей работе, и экспериментально измеренными сопротивлениями заземляющих устройств при проведении натурных экспериментов, позволяют использовать приведенные эмпирические выражения при проектировании заземляющих устройств.

При исследовании влияния смеси на коэффициент сезонности установлено, что при засыпке смесью горизонтальной полосы коэффициент сезонности снижается до 20 % по сравнению с контрольным заземлителем. А в случае, если при монтаже вертикальных

электродов смесью обработано и их околоэлектродное пространство, коэффициент сезонности снижается до 25 % по сравнению с контрольными значениями для необработанного заземлителя. При этом использование в составе смесей проводящих добавок позволяет до 3 раз уменьшить сопротивление растеканию тока при той же конфигурации заземляющих устройств.

Для дальнейшего изучения влияния разработанного состава смеси на эксплуатационные характеристики заземляющих устройств, смонтированных на разных типах грунта и при разной глубине залегания грунтовых вод, а также перспективы использования ее совместно с пластинчатыми и решетчатыми заземлителями необходимо внедрение ее в опытную эксплуатацию. Отдельное внимание необходимо уделить возможности изменения состава с целью подавления коррозионной активности почвы в местах монтажа заземляющих устройств. При размещении заземлителей в суглинках, суглинках с агрессивными водами, супесях, супесях мокрых, песке всех видов ожидается низкая коррозионная активность (характерно для всех областей Республики Беларусь) [8]. В сухих грунтах (влажностью до 5 %) коррозия не ожидается из-за отсутствия электролита.

Строительство заземляющих устройств электрических подстанций напряжением 35 кВ и выше, расположенных в грунтах с плохой проводимостью, сопряжено со значительными финансовыми и трудовыми затратами, применение смесей может снизить как стоимость материалов самого заземлителя, так и затраты на его строительство. При проведении дальнейших исследований и опытной эксплуатации актуальна задача проведения экономического сравнения традиционно выполненного заземления и заземления, содержащего разработанный состав смеси.

В Республике Беларусь с вводом в действие ТКП-427 нормируемое значение наведенного напряжения снизилось с 42 В до 25 В. Ужесточение данного критерия, в свою очередь, повлекло за собой необходимость пересмотра перечня линий, при отключении и заземлении которых по концам (в распределительных устройствах подстанций и станций) значение наведенного напряжения на заземленных проводах, пересчитанное к наибольшему длительно допустимому току влияющей воздушной линии электропередачи (ВЛ), превышает допустимое значение.

Разработка мероприятий по защите от наведенного напряжения основывается на оценке условий электробезопасности на ВЛ под наведенным напряжением при определенной схеме заземления ВЛ, линейного оборудования, рабочих участков и рабочих мест. При этом критерием эффективности защитных мероприятий является снижение наведенного напряжения на заземленном рабочем месте до уровня, не превышающего безопасной величины 25 В. В Белорусской энергосистеме ранее разработана схема заземления, смысл которой заключается в установке на ВЛ стационарного специального низкоомного заземляющего устройства (СЗУ) в определенных (расчетных) местах, что позволяет снижать уровень наведенного напряжения до безопасных величин по всей длине или на отдельных участках ВЛ.

Особые трудности возникают при монтаже СЗУ в высокоомных грунтах, так как нормируемое сопротивление заземления опор находится в прямой зависимости от удельного электрического сопротивления земли. Величина сопротивления СЗУ определяется при расчете наведенного напряжения по критерию обеспечения электробезопасности при работах на проводах ВЛ, а нормируемое сопротивление заземления опор выбирается по критерию обеспечения грозоупорности изоляции ВЛ. Поэтому величина сопротивления СЗУ может быть значительно меньше величины нормируемого сопротивления заземления опор и составлять менее 1 Ом.

В таблице приведены расчетные объемы металла на выполнение конструкций СЗУ с учетом предоставленных одним из электросетевых филиалов максимальных токов по влияющим ВЛ.

Объемы металла на выполнение конструкций СЗУ

Код опоры	Требуемое сопротивление СЗУ, Ом	Наименьшее удельное эквивалентное сопротивление грунта, Ом·м	Объемы металла		
			длина вертикальных электродов, м	количество вертикальных электродов, шт.	Общая протяженность, м
1	1,6	3691	30	152	4560
2	1,6	2620	5	272	1360
3	2,7	593	15	10	150
4	1,25	233	15	16	240
5	1,9	371	15	18	270
6	1,3	157	5	28	140
7	0,6	3691	30	292	8700
8	0,6	757	15	200	3000
9	1,4	1357	15	140	2100

После монтажа указанных в таблице СЗУ и измерения их сопротивления растеканию сделан вывод, что проектные и реальные значения сопротивления СЗУ практически совпадают, что свидетельствует о корректности проведенных геофизических изысканий и аналитических расчетов.

Применение смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта, возможно, позволило бы значительно уменьшить объемы металла на выполнение конструкций СЗУ, что, в свою очередь, повлекло бы и уменьшение стоимости строительно-монтажных работ. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования смонтированных с применением смеси заземляющих устройств при размещении их в грунтах с различным удельным электрическим сопротивлением. После верификации разработанной смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила результаты исследований будут оформлены в виде методических указаний по ее применению в зависимости от геофизических условий месторасположения заземляющего устройства электроустановки.

Выводы

1. Применение смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила наиболее эффективно при использовании совместно с заземлителями, глубина заложения которых меньше глубины промерзания грунта, то есть находящимися в слоях грунта с наибольшими сезонными колебаниями, и будет расти при увеличении площади контакта таких заземлителей с грунтом, обработанным гидролизированным полиакрилонитрилом.
2. Дополнительное уменьшения коэффициента сезонности для вертикальных составных заземлителей, по-видимому, обусловлено влиянием смеси на их части смонтированные вблизи поверхности грунта.
3. Применение комплексных смесей, содержащих, помимо гидростабилизирующих добавок, также и низкодиспергированные проводящие вещества, позволяет до трех раз уменьшить сопротивление заземляющих устройств в сравнении с контрольными заземляющими устройствами, сгладить сезонные колебания сопротивления заземляющих устройств и капитальные затраты на монтаж заземляющих устройств путем уменьшения количества электродов и размеров территории, на которой они располагаются.

Литература

1. Найденов А.И., Дмитриев Е.А. Параметры заземляющих устройств для защиты персонала и оборудования // Вестник ИрГТУ. 2011. №11 (58). С. 109-112.
2. Соснин В.В. Функциональное заземление // Главный энергетик. 2020. № 7. С. 15-22.
3. Ивлиев Е.А. К расчету электрических параметров стержневых заземлителей // Электричество. 1992. № 7. С. 41-44.
4. Веденеева Л.М., Чудинов А.В. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16. № 1. С. 89-100.
5. Криксин П.В., Бохан Н.В. Заземляющее устройство подстанций - основа обеспечения электромагнитной совместимости технических средств. Опыт Белорусской энергосистемы // Энергия и менеджмент. 2011. №6 (63). С.18-20.
6. Zhuang Chi-jie, Zeng Rong, Zhang Bo, et al. Grounding system design method in high soil resistivity regions [J]. High Voltage Engineering. 2008. V. 34(5). pp.893-897.
7. Coelho Vilson, L. Piantini A, Almaguer Hugo A.D., et al. The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems // In The Lightning Flash and Lightning Protection (SIPDA 2013). Electric Power Systems Research. 2015. January. V. 118. pp. 76-82.
8. Драко М.А. Коррозия заземлителей электроустановок // Энергетическая стратегия. 2019. № 6 (69). С. 44-48.
9. Tung C.C., Lim S.C. Performance of electrical grounding system in soil at low moisture content condition at various compression levels // Journal of Engineering Science and Technology. 2017. V. 12, Special Issue 1. pp. 27-47.
10. Грибанов А.Н. Бипрон – заземление электроустановок // Экспозиция Нефть Газ. 2016. С. 72-75.
11. Киселев В.Г., Рузич Е.Н. Диэлектрические покрытия и их влияние на защиту от коррозии наружной поверхности подземных трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20(1-2). С.80-89.

12. Дремичева Е.С., Зверева Э.Р. Изучение коррозионных процессов нефтяного оборудования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018;20 (1-2):138-143.
13. Осипенко О.В., Драко М.А., Мойсеенко О.А. Анализ дефектов строительных конструкций высоковольтных подстанций и линий электропередачи и меры по недопущению их дальнейшего развития // Энергия и менеджмент. 2015. № 1 (82). С. 5-9.
14. Колик В.Р., Драко М.А., Мойсеенко О.А. Актуальность обследования заземляющего устройства и устройств молниезащиты подстанций 35 кВ и выше // Энергетическая стратегия. 2014. № 2. С. 23–25.
15. Леонович И.И., Вырко Н.П. Глубина промерзания грунтов - важнейший фактор водно-теплового режима земляного полотна Depth of soil freezing - a determining factor of the water-heat regime of the roadbed // Строительная наука и техника. 2011. №5. С. 27–35.
16. Барайшук С.М., Павлович И.А. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажностью добавками // Агропанорама. 2020. № 1 (137). С. 20-23.
17. Shi L., Yang N., Zhang H., et al. Anovel poly (glutamic acid) /silk-sericinhydrogel for wound dressing: Synthesis, characterization and biological evaluation // Materials Science and Engineering: C. 2009. V. 48 (1). pp. 533-540.
18. Ferre P.A., Redman J.D., Rudolph D.L. and R.G. Kachanosk. «The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand», Water Resour. Res., 1998.
19. Lai, Yang & Hu, Yuhang. (2018). Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through AFM-based dynamic nanoindentation. Soft Matter. 14. 10.1039/C7SM02351K.
20. Ширинов Ш.Д., Джалилов А.Т. Исследование кинетики набухания синтезированных гидросорбентов на основе гидролизованного полиакрилонитрила // Universum: Химия и биология : электрон. научн. журн. 2018. № 3 (45).
21. M. Russo, H. Warren, G. Spinks, D. MacFarlane, J. Pringle Hydrogels containing the ferri/ferrocyanide redox couple and ionic Liquids for thermocells. Australian Journal of Chemistry. 201, 72. 10.1071/CH18395.
22. Lai Y., Hu Y. Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through afm-based dynamic nanoindentation Soft Matter. 2018. № 14 10.1039/C7SM02351K
23. H. Dehne, F. Hecht, A. Bausch The mechanical properties of polymer-colloid hybrid hydrogels. Soft Matter 2017. №13. 10.1039/C7SM00628D.
24. Зайцева, Н.М. Экспериментальное определение удельного электрического сопротивления / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. №1. С. 351–354.
25. M. Hannig. Calculation of the assembled grounding resistance from complex grounding systems by using analytical considerations only. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). doi: 10.1109/ICHVE.2018.8641921.
26. Unde M.G., Kushare B.E. Grounding grid performance of substation in two layer soil - a parametric analysis // International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. 2012. V.1. № 2. P. 69-76. doi: 10.7323/ijeset/v1_i2_8.
27. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer // Electronic modeling. 2014. V.36, №2. pp. 89–97.
28. Jovanovic D, Cvetkovic N., Raicevic N., Hederic Z. (2016). Comparative analysis of plate and grid ground electrode characteristics as a part of grounding system. 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST) Published 2016 Engineering pp.35-40. 10.1109/SST.2016.7765628.
29. Chung seog Choi, Hyang Kon Kim, Hyoung Jun Gil, et al. The Potential Gradient of Ground Surface according to Shapes of Mesh Grid Grounding Electrode Using Reduced Scale Model. IEEE Trans. on Power and Energy. 2005. V. 125, N. 12. pp. 1170- 1176.
30. Myint, Su Mon; Hla Khin ,Thidar TunTheint. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration; Bhopal. 2020.V.7. Iss.63. pp. 28-35.

Авторы публикации

Драко Михаил Александрович – магистр техн. наук, исследователь, заведующий электротехнической лабораторией отдела учета и качества электроэнергии РУП «Белэнергосетьпроект».

Барайшук Сергей Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой практической подготовки студентов, Белорусский государственный аграрно-технический университет.

Павлович Иван Александрович – ассистент кафедры практической подготовки студентов, Белорусский государственный аграрно-технический университет.

References

1. Naydenov AI, Dmitriev EA. Parameters of grounding devices for the protection of personnel and equipment. *Vestnik ISTU*. 2011;11 (58):109–112.
2. Sosnin VV. Functional grounding. *Chief Power Engineer*. 2020;7:15-22.
3. Ivliev EA. Electricity. 1992;7:41-44.
4. Vedeneva LM, Chudinov AV. Investigation of the influence of basic soil properties on the resistance of grounding device. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*. 2017;16(1):89-100.
5. Kriksin PV, Bohan NV. *Energy and management*. 2011;6 (63):18-20.
6. Zhuang Chi-jie, Zeng Rong, Zhang Bo, et al. Grounding system design method in high soil resistivity regions [J]. *High Voltage Engineering*. 2008;34(5):893-897.
7. Coelho Vilson L, Piantini A, Almaguer Hugo AD, et al. *The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems*. In The Lightning Flash and Lightning Protection (SIPDA 2013). Electric Power Systems Research. 2015;118:76-82.
8. Drako M.A. *Energy strategy*. 2019;6 (69):44-48.
9. Tung CC, Lim SC. Performance of electrical grounding system in soil at low moisture content condition at various compression levels. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2017;12(1):27–47.
10. Gribanov, Bipron AN. - grounding of electrical installations. Exposition Oil Gas. 2016. P. 72–75.
11. Kiselev VG, Ruzich EN. Dielectric coatings and their effect on corrosion protection of the outer surface of underground pipelines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):80-89.
12. Dremicheva ES, Zvereva ER. Study corrosion processes of oil equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):138-143.
13. Osipenko OV, Drako MA, Moiseenko OA. *Energy and management*. 2015;1 (82):5-9.
14. Kolik VR, Drako MA, Moiseenko OA. *Energy Strategy*. 2014;2:23–25.
15. Leonovich II, Virko NP. *Construction science and technology*, 2011;5:27–35.
16. Baraishuk SM, Pavlovich IA. *Agropanorama*. 2020;1 (137):20-23.
17. Shi L, Yang N, Zhang H, et al. *Anovel poly (glutamic acid) /silk-sericinhydrogel for wound dressing: Synthesis, characterization and biological evaluation*. Materials Science and Engineering: C. 2009;48 (1):533-540.
18. Ferre PA, Redman JD, Rudolph DL, et al. *The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand*, *Water Resour. Res.*, 1998.
19. Lai, Yang & Hu, Yuhang. (2018). Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through AFM-based dynamic nanoindentation. *Soft Matter*. 14. 10.1039/C7SM02351K.
20. Shirinov ShD, Jalilov AT. *Universum: Chemistry and biology: electron. scientific. zhurn*. 2018;3 (45).
21. Russo Matthew & Warren Holly & Spinks, et al. (2018). Hydrogels Containing the Ferri/Ferrocyanide Redox Couple and Ionic Liquids for Thermocells. *Australian Journal of Chemistry*. 72. 10.1071/CH18395.
22. Lai Y, Hu Y. Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through afm-based dynamic nanoindentation *Soft Matter*. 2018;14 10.1039/C7SM02351K.
23. Dehne H, Hecht F, Bausch A. The mechanical properties of polymer-colloid hybrid hydrogels. *Soft Matter* 2017;13:10.1039/C7SM00628D.
24. Zaitseva NM. Experimental determination of electrical resistivity. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2011;1:351–354.
25. Hannig M. *Calculation of the assembled grounding resistance from complex grounding systems by using analytical considerations onlty*. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8641921.

26. Unde MG, Kushare BE. Grounding grid performance of substation in two layer soil - a parametric analysis. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*. 2012;1(2):69-76. doi: 10.7323/ijeset/v1_i2_8.

27. Koliushko DG, Rudenko SS. Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer. *Electronic modeling*. 2014;36(2):89-97.

28 Jovanovic D, Cvetkovic N, Raicevic N, et al. (2016). Comparative analysis of plate and grid ground electrode characteristics as a part of grounding system. 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST) Published 2016 Engineering pp.35-40. 10.1109/SST.2016.7765628.

29. Chung seog Choi, Hyang Kon Kim, Hyoung Jun Gil, et al. The Potential Gradient of Ground Surface according to Shapes of Mesh Grid Grounding Electrode Using Reduced Scale Model”, *IEEEJ Trans. on Power and Energy*. 2005;125(12):1170-1176.

30. Myint Su, Mon Hla, Khin Thidar; et al. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. Bhopal.2020;7:63.:28-35.

Authors of the publication

Mikhail A. Drako – Scientific-Research Project Republican Unitary Enterprise, Minsk, Republic of Belarus.

Siarhei M. Baraishuk – Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

Ivan A. Pavlovich – Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

Получено

10 февраля 2021г.

Отредактировано

26 февраля 2021г.

Принято

05 марта 2021г.

АЛГОРИТМЫ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Е.И. Грачева¹, О.В. Наумов¹, А.Н. Горлов², З.М. Шакурова¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Юго-Западный Государственный Университет, г. Курск, Россия

err.kgeu@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы функционирования СЭС. Разработать алгоритмы для оценки параметров эффективности функционирования систем внутризаводского электроснабжения. Исследовать работоспособность низковольтных цеховых сетей радиальной, магистральной и смешанной структуры в оптимальных режимах эксплуатации оборудования при моделировании воздействия внешних факторов, таких, как среднеквадратичный коэффициент загрузки оборудования, температура помещения цеха и расчетный интервал времени на рабочие параметры системы. В качестве рабочих параметров системы приняты: величина эквивалентного сопротивления низковольтной электрической сети, величина потерь активной мощности и величина потерь электроэнергии в низковольтной сети. *МЕТОДЫ.* При решении поставленных задач применялись вероятностно-статистические методы оценки функциональных параметров систем. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье рассмотрены особенности функционирования низковольтных сетей систем внутризаводского электроснабжения. Разработаны модели и произведен расчет характеристик работоспособности электрических сетей низкого напряжения различной топологии в зависимости от основных схемных и режимных параметров электрооборудования при изменении значений пределов интенсивностей внешних воздействий. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Применение вероятностных методов позволяет учитывать динамику основных параметров систем внутризаводского электроснабжения при оценке эффективности их функционирования. Расчеты показали как изменяются характеристики работоспособности таких систем в зависимости от интервалов варьирования внешних факторов в условиях эксплуатации. Полученные результаты позволяют рекомендовать применение разработанных моделей для эффективного управления схемными и режимными параметрами электрических сетей низкого напряжения для повышения качества электроснабжения потребителей.

Принято, что для внешних параметров случайного характера достоверным является нормальное распределение. Разработаны алгоритмы расчета характеристик функционирования внутризаводских систем электроснабжения различной топологии и конструктивного исполнения при различных значениях пределов интенсивностей внешних воздействий рабочих параметров. При этом установлено, что с увеличением (уменьшением) интервалов изменения внешних параметров уменьшается (увеличивается) их допустимая интенсивность по отношению к максимальному значению интенсивности для различных режимов работы оборудования.

Ключевые слова: внутризаводское электроснабжение, оптимальные режимы, условия эксплуатации, внешние факторы, рабочие параметры.

Благодарности: Публикация выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, проект № 0851-2020-0032 «Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем».

Для цитирования: Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н, Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутризаводского электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 93-104. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-93-104.

ALGORITHMS AND PROBABILISTIC MODELS OF PARAMETERS OF OPERATION OF IN-PLANT POWER SUPPLY

El. Gracheva¹, OV. Naumov¹, AN. Gorlov², ZM. Shakurova¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

epp.kgeu@mail.ru

Abstract: *PURPOSE.* To address the problems of the functioning of the SES. To develop algorithms for evaluating the parameters of the efficiency of the functioning of the systems of intra-plant power supply. To investigate the operability of low-voltage shop networks of radial, trunk and mixed structure in optimal operating conditions of the equipment when modeling the impact of external factors, such as the root-mean-square load factor of the equipment, the temperature of the shop room and the calculated time interval on the operating parameters of the system. As the operating parameters of the system are accepted: the value of the equivalent resistance of the low-voltage electrical network. the amount of active power loss and the amount of electricity loss in the low-voltage network. *METHODS.* Probabilistic and statistical methods for evaluating the functional parameters of systems were used to solve the tasks. *RESULTS.* The article considers the features of the functioning of low-voltage networks of intra-plant power supply systems. Models are developed and the performance characteristics of low-voltage electrical networks of various topologies are calculated depending on the main circuit and operating parameters of electrical equipment when the values of the limits of the intensity of external influences change. *CONCLUSION.* The use of probabilistic methods allows us to take into account the dynamics of the main parameters of in-plant power supply systems when evaluating the effectiveness of their functioning. The calculations showed how the performance characteristics of such systems change depending on the intervals of variation of external factors in the operating conditions. The results obtained allow us to recommend the use of the developed models for effective control of circuit and mode parameters of low-voltage electrical networks to improve the quality of power supply to consumers.

It is assumed that for external parameters of a random nature, the normal distribution is reliable. Algorithms for calculating the performance characteristics of in-plant power supply systems of various topologies and designs at different values of the limits of the intensity of external influences of the operating parameters are developed. At the same time, it is established that with an increase (decrease) in the intervals of changes in external parameters, their permissible intensity decreases (increases) in relation to the maximum intensity value for various operating modes of the equipment.

Key words: in-plant power supply, optimal modes, operating conditions, external factors, operating parameters.

Acknowledgments: The publication was supported by the state task of the Ministry of higher education and science of the Russian Federation, project No. 0851-2020-0032 "Research of algorithms, models and methods for improving the efficiency of complex technical systems".

For citation: Gracheva El., Naumov OV., Gorlov AN., Shakurova ZM. Algorithms and probabilistic models of parameters of operation of in-plant power supply. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):93-104. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-93-104.

Введение

В настоящее время с усложнением технологических процессов [1-5] на предприятиях и цифровизацией производственных процессов ужесточаются требования к качеству функционирования электрооборудования [6-12]. Электрические промышленные сети низкого напряжения отличаются низкой информационной обеспеченностью о схемных и режимных характеристиках электроустановок. Поэтому возникает задача в разработке алгоритмов моделей для оценки параметрических показателей эффективности эксплуатации таких систем [13-17]. При этом рациональным является заданные технических параметров интервалами изменения их значений.

Материалы и методы

Исследуем параметры функционирования электрической сети низкого напряжения. Проанализируем работоспособность внутрицеховой сети с функциональными характеристиками a_1 , a_2 и a_3 . Примем, что при эффективное функционирование характеризуется следующими условиями:

$$a_1 > v_{11}, a_1 < v_{12}, \dots, a_3 > v_{31}, a_3 > v_{32},$$

где v_{i1} и v_{i2} - пределы изменения величины a_i .

Исследуем низковольтные схемы сетей различной топологии - радиальную, магистральную и радиально-магистральную.

В качестве рабочих параметров приняты величины эквивалентного сопротивления схемы $R_{э\text{кв}}=a_1$, величина потерь активной мощности $\Delta P=a_2$ и величина потерь электроэнергии в сети $\Delta W=a_3$.

Определим величину сопротивления линии по выражению (1)

$$R = R_{20} \cdot L \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_{жс} - 20)] + \sum_1^k r_{a_k} \quad (1)$$

где R_{20} – величина сопротивления одного метра токопроводящей жилы линии с учетом температуры окружающей среды 20^0 C; L – длина линии;

α – величина температурной постоянной увеличения сопротивления,

$\theta_{жс}$ – величина температуры нагревания токопроводящей жилы;

r_{a_k} – величина сопротивления контактных групп к-ого электрического аппарата,

установленного на линии.

Для кабельной линии марки АВВГ, сечением $S=25 \text{ мм}^2$, $I_{доп}=75 \text{ А}$, $\theta_{жс}=70^0\text{C}$, значение величины удельного сопротивления алюминия $\rho_{20}=0,03 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Тогда

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho_{20}}{S} \cdot L \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] + \sum_1^k r_{a_k} = \frac{\rho_{20}}{S} \cdot L \cdot \\ &\cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_{доп}} \right) \left(2 \cdot (T - \theta_{окр}) + \theta_{окр} - 20 \right) \right] + \sum_1^k r_{a_k} = \frac{0,03}{25} \cdot L \cdot \\ &\cdot \left[1 + 0,00403 \cdot \left(\left(\frac{I}{75} \right)^2 \cdot (70 - 20) + 20 - 20 \right) \right] + \sum_1^k r_{a_k}, \text{ Ом} \end{aligned} \quad (2)$$

Второй рабочий параметр ΔP записывается в виде:

$$\begin{aligned} \Delta P &= 3 \cdot I_p^2 \cdot R = 3,54 \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot I_p^2 + 1,26 \cdot 10^{-7} \cdot \\ &\cdot L \cdot I_p^4 + 3 \cdot I_p^2 \cdot \sum_1^k r_{a_k} \end{aligned} \quad (3)$$

где I_p – значение рабочего тока, протекающего в линии.

Третий рабочий параметр ΔW определяется как:

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta P \cdot T_M = 14,16 \cdot L \cdot I_p^2 + 5,04 \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot I_p^4 + \\ &+ 12 \cdot 10^3 \cdot I_p^2 \cdot \sum_1^k r_{a_k} \end{aligned} \quad (4)$$

где $T_M=4000 \text{ ч}$ – значение времени расчетного периода.

Определим значения рабочих параметров для схем различной топологии:

1. Радиальная сеть (рис. 1а):

$$R_{э\text{кв}} = f(n, L_{ср}, I_p, r_a) = 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot L_{ср} \cdot \frac{1}{n} + 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot L_{ср} \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n} + r_a \cdot \frac{1}{n}; \quad (5)$$

$$\Delta P = 3,54 \cdot 10^{-3} \cdot I^2 \cdot L_{ср} \cdot \frac{1}{n} + 1,26 \cdot 10^{-7} \cdot L_{ср} \cdot I^4 \cdot \frac{1}{n} + 3 \cdot r_a \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n}; \quad (6)$$

$$\Delta W = 14,16 \cdot I^2 \cdot L_{ср} \cdot \frac{1}{n} + 5,04 \cdot 10^{-4} \cdot L_{ср} \cdot I^4 \cdot \frac{1}{n} + 12 \cdot 10^3 \cdot r_a \cdot I^2 \cdot \frac{1}{n}; \quad (7)$$

2. Для магистральной схемы, выполненной распределительным шинопроводом ШРА-73, $R_0=0,15 \text{ Ом/км}$ (рисунк1б)

$$R_{\text{экв}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot L_{\text{ср}} + 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{n} + 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot L_{\text{ср}} \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n} + r_a \cdot \frac{1}{n}; \quad (8)$$

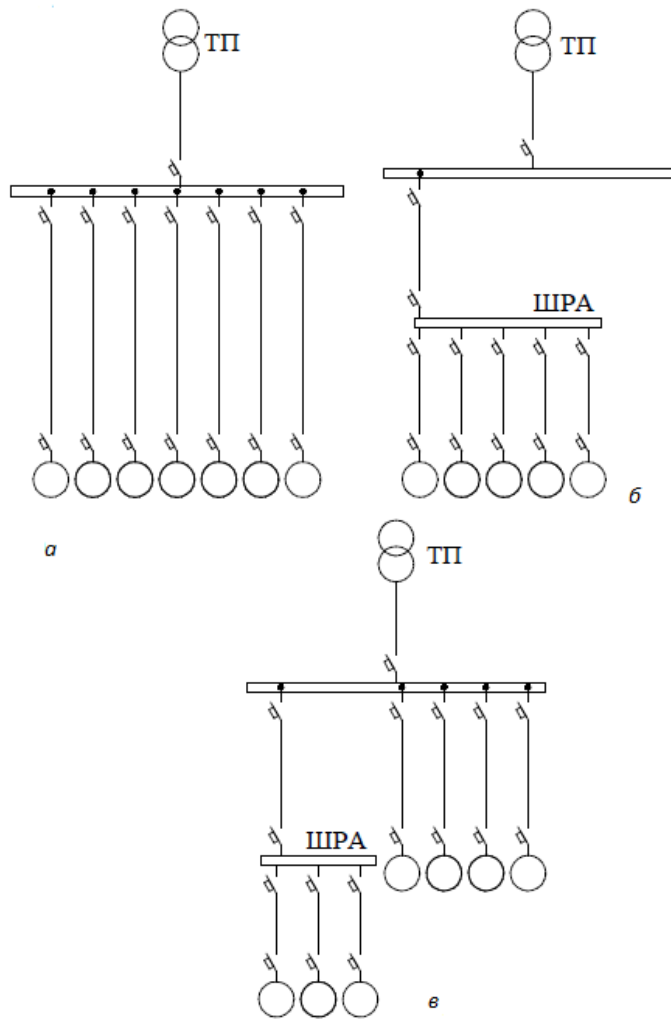


Рис.1 Схемы низковольтных электрических сетей различной топологии:
а – схема радиальной сети; б – схема магистральной сети (распределительный шинопровод); в –
схема радиально-магистральная.

Fig.1. Schemes of low-voltage electrical networks of various topologies:
a - scheme of the radial network; б - scheme of the main network (distribution busbar); c - scheme of the
radial-main

$$\begin{aligned} \Delta P = & 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 \cdot L_{\text{ср}} + 3,54 \cdot 10^{-3} \cdot I_p^2 \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{n} + \\ & + 1,26 \cdot 10^{-7} \cdot L_{\text{ср}} \cdot I^4 \cdot \frac{1}{n} + 3 \cdot r_a \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta W = & 18 \cdot I^2 \cdot L_{\text{ср}} + 14,16 \cdot I_p^2 \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{n} + 5,04 \cdot 10^{-4} \cdot \\ & \cdot L_{\text{ср}} \cdot I^4 \cdot \frac{1}{n} + 12 \cdot 10^3 \cdot r_a \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n}; \end{aligned} \quad (10)$$

3. Для схемы смешанного типа (рисунок 1в):

$$\begin{aligned} R_{\text{экв}} = & 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{n} + 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{n^2} + \\ & + 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot L_{\text{ср}} \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n^2} + r_a \cdot \frac{1}{n^2}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta P = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 \cdot L_{\text{ср}} + 3,54 \cdot 10^{-3} \cdot I_p^2 \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{n^2} +$$

$$+ 1,26 \cdot 10^{-7} \cdot L_{\text{ср}} \cdot I^4 \cdot \frac{1}{n^2} + 3 \cdot r_a \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n^2}; \quad (12)$$

$$\Delta W = 18 \cdot I_p^2 \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{n} + 14,16 \cdot I^2 \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{n^2} + 5,04 \cdot 10^{-4} \cdot$$

$$\cdot L_{\text{ср}} \cdot I_p^4 \cdot \frac{1}{n^2} + 12 \cdot 10^3 \cdot r_a \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n}; \quad (13)$$

где n , $L_{\text{ср}}$ и r_a – значения эксплуатационных факторов.

Эксплуатационными параметрами при моделировании являются значение средней

длины линии $L_{\text{ср}}$, $L_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}$, значение расчетного тока в нормальном режиме I_p , число отходящих линий n и число электрических аппаратов n_{ak} , установленных на линии. Интервалы изменений эксплуатационных параметров: значение длин линий 3-120 м, значение расчетных токов 8-80 А, число отходящих линий 3-12, значения сопротивления автоматических выключателей ВА-57 на линии - 4,7÷187 мОм при их числе на линии- 1-4, $r_{ak} = f(I_k I_p) \cdot n_k$.

Принято, что при функционировании на систему воздействуют три внешних фактора: среднеквадратическая нагрузка оборудования $K_{\text{загр}}$, значение температуры помещения цеха $\theta_{\text{окр.сред.}}$ и расчетный интервал времени $T_{\text{рабоч.}}$. Принят нормальный закон исследуемых параметров. Определим плотность вероятности:

$$f(t) = \frac{1}{\delta_t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-a)^2}{2\delta_t^2}} \quad (14)$$

где δ_t – значение статистического среднеквадратического отклонения случайных величин

$$\delta_t = \sqrt{D_t} \quad (15)$$

D_t – значение статической дисперсии случайных величин t ,

$$D_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - m_t)^2 \quad (16)$$

m_t – математическое ожидание t ,

$$m_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (17)$$

где $K_{\text{загр}}$, варьируемого от 0,3 до 1,3, имеем:

$$m_t = \frac{1}{12} \left(0,3 + 0,3 + 0,5 + 0,75 + 1,0 + 1,2 + 1,3 + \right. \\ \left. + 1,3 + 1,2 + 1,0 + 1,0 + 1,0 \right) = 0,9^{12}$$

$$D_t = \frac{1}{12} [2 \cdot (0,3 - 0,9)^2 + (0,5 - 0,9)^2 + (0,75 - 0,9)^2 + \\ + 4 \cdot (1,0 - 0,9)^2 + 2 \cdot (1,2 - 0,9)^2 + 2 \cdot (1,3 - 0,9)^2] = 0,119$$

$$\delta_t = \sqrt{0,119} = 0,345$$

$$K_{\text{загр}}(t) = \frac{1}{0,345 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-0,9)^2}{0,238}}$$

Представим результаты расчета для факторов загрузки оборудования $K_{\text{загр}}$:

$$(0,5 \div 1,0) \quad K_{\text{загр}}(t) = \frac{1}{0,179 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-0,742)^2}{0,065}} \quad (18)$$

$$(0,5 \div 1,3) \quad K_{\text{загр}}(t) = \frac{1}{0,252 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-1,033)^2}{0,127}} \quad (19)$$

- фактора температуры помещения цеха $\theta_{\text{окр.ср.}}$:

$$(5 \div 35) \text{ } ^\circ\text{C} \quad \theta_{\text{окр.ср.д.}}(t) = \frac{1}{8,37 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-21,58)^2}{140,14}} \quad (20)$$

$$(5 \div 15) \text{ } ^\circ\text{C} \quad \theta_{\text{окр.ср.д.}}(t) = \frac{1}{3,99 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-9,166)^2}{31,94}} \quad (21)$$

$$(5 \div 25) \text{ } ^\circ\text{C} \quad \theta_{\text{окр.ср.д.}}(t) = \frac{1}{7,217 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-17,5)^2}{104,16}} \quad (22)$$

- расчетного интервала времени $T_{\text{рабоч.}}$:

$$(83 \div 416) \text{ час} \quad T_{\text{рабоч.}}(t) = \frac{1}{98,28 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-266)^2}{19321,5}} \quad (23)$$

$$(127 \div 250) \text{ час} \quad T_{\text{рабоч.}}(t) = \frac{1}{332,7 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-202)^2}{2138,4}} \quad (24)$$

$$(83 \div 416) \text{ час} \quad T_{\text{рабоч.}}(t) = \frac{1}{98,84 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-266)^2}{17989,3}} \quad (25)$$

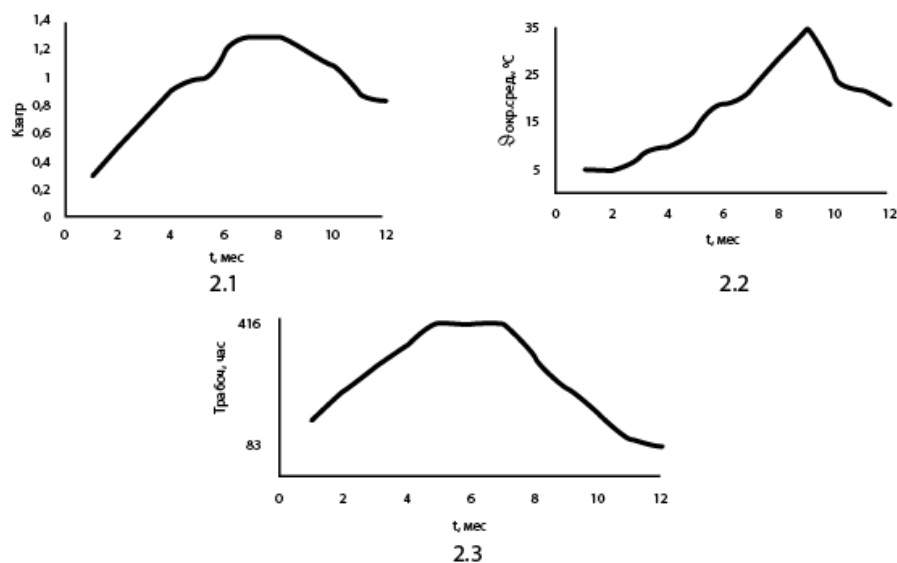


Рис.2. График изменения интенсивностей факторов в рассматриваемых интервалах:

2.1 $K_{\text{загр}} = (0,3 \div 1,3)$; 2.2 $\theta_{\text{окр.ср.д.}} = (5 \div 35) \text{ } ^\circ\text{C}$; 2.3 $T_{\text{рабоч.}} = (83 \div 416) \text{ ч.}$

Fig.2. Graph of changes in the intensity of factors in the considered intervals

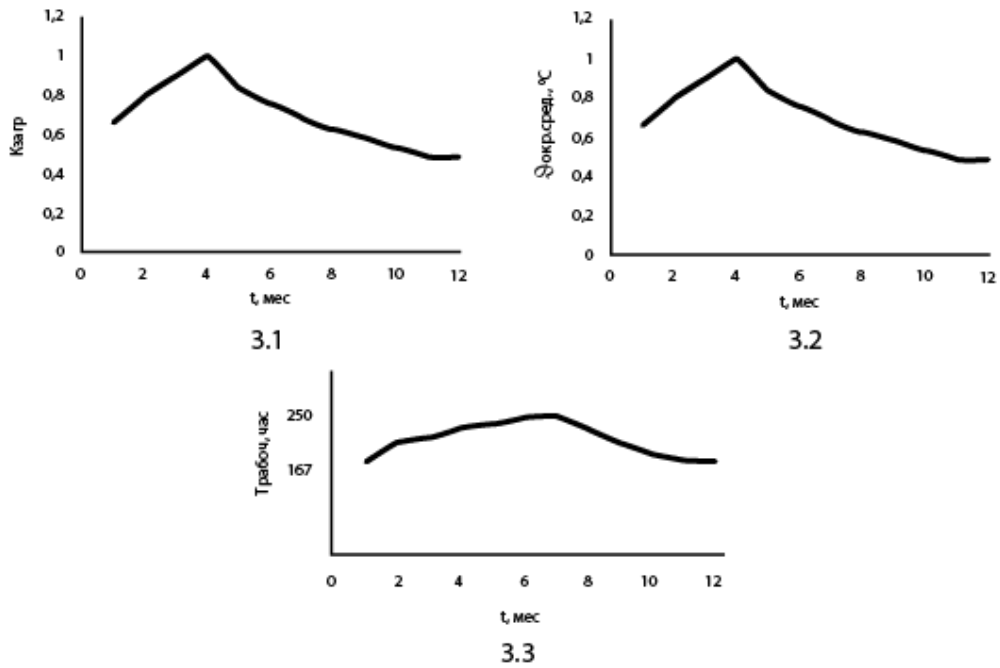


Рис.3. График изменения интенсивностей факторов в рассматриваемых интервалах:

3.1 $K_{загр} = (0,5 \div 1,1)$; 3.2 $\theta_{окр.сред.} = (5 \div 20) ^\circ C$; 3.3 $T_{рабоч.} = (167 \div 250) ч.$

Fig.3. Graph of changes in the intensity of factors in the considered intervals

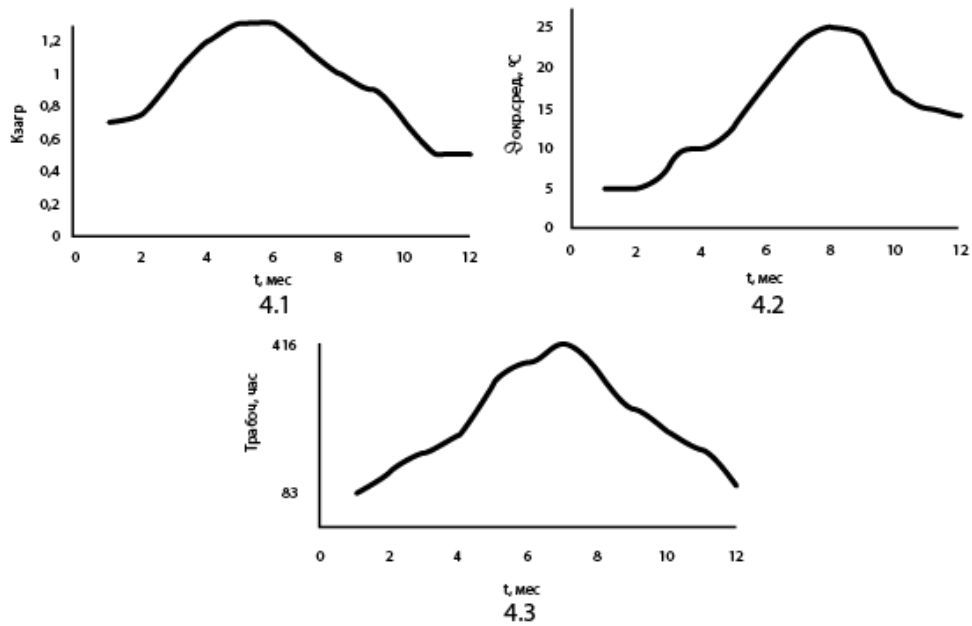


Рис.4. График изменения интенсивностей факторов в рассматриваемых интервалах:

4.1 $K_{загр} = (0,5 \div 1,3)$; 4.2 $\theta_{окр.сред.} = (5 \div 25) ^\circ C$; 4.3 $T_{рабоч.} = (85 \div 410) ч.$

где t – номер месяца в году, $1 \div 12$.

Принимаем, что $\varphi(K_{загр}, \theta_{окр.сред.}, T_{рабоч.}) = \varphi(K_{загр}) \cdot \varphi(\theta_{окр.сред.}) \cdot \varphi(T_{рабоч.})$ (26)

где $\varphi(K_{загр}, \theta_{окр.сред.}, T_{рабоч.})$ – вероятностное распределение внешних факторов. Соответствие (26) выполняется, т.к. параметры $K_{загр}$, $\theta_{окр.сред.}$, $T_{рабоч.}$ являются независимыми величинами.

Определим вероятность функционирования исследуемых систем внутривозовского электроснабжения с различной топологией внутрицеховых схем в оптимальных режимах эксплуатации по выражению (27)

$$v = \int_{\varphi(t)} \dots \int \varphi(a) da_1 da_2 da_3 \quad (27)$$

где $\varphi(a)$ – многомерное дифференциальное выражение векторной величины "а", координаты которой a_1, a_2, a_3 – случайные величины, определяемые внешними факторами [1].

Преобразуем выражение (27) к виду:

$$v = \int_{\varphi(t)} \dots \int \varphi(t_1, t_2, t_3) \cdot \left[\prod_{i=1}^n v_i(t_1, t_2, t_3) \right] \cdot dt_1 dt_2 dt_3 \quad (28)$$

где $v_i(t_1, t_2, t_3)$ – значение вероятности величин $R_{\text{эКВ}}, \Delta P, \Delta W$ в области допустимых значений в зависимости от воздействующих внешних факторов.

Обсуждение результатов

В соответствии с разработанным алгоритмом вычислим значение v_i для схем внутриводских электрических сетей различной топологии.

$$\begin{aligned} v_i(t_1, t_2, t_3) = & \int_1^{12} \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} \varphi(B_{12}) \varphi_{at}[(e_{12} - a_1) - B_{12}] d e_{12} d L_{cp} \cdot \\ & \cdot d I_p \cdot d r_k \cdot d n \cdot \int_1^{12} \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} \varphi_t(B_{2_2}) \varphi_{at}[(e_{2_2} - a_2) - e_{2_2}] d e_{2_2} \cdot \\ & \cdot d L_{cp} \cdot d I_p \cdot d r_k \cdot d n \cdot \int_1^{12} \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} \varphi_t(B_{3_2}) \varphi_{at}[(e_{3_2} - a_3) - e_{3_2}] \cdot \\ & \cdot d e_{3_2} \cdot d L_{cp} \cdot d I_p \cdot d r_k d n \end{aligned} \quad (29)$$

При подстановке выражение (29) в (28) имеем:

$$\begin{aligned} v = & \int_1^{12} \varphi(t_1) dt_1 \cdot \int_1^{12} \varphi(t_2) dt_2 \cdot \int_1^{12} \varphi(t_3) dt_3 \cdot \int_1^{12} \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} \varphi(B_{12}) \cdot \varphi_{at}[(e_{12} - a_1) - e_{12}] \cdot \\ & \cdot d e_{12} \cdot d L_{cp} \cdot d I_p \cdot d r_k \cdot d n \cdot \int_1^{12} \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} \varphi(B_{2_2}) \cdot \varphi_{at}[(e_{2_2} - a_2) - e_{2_2}] \cdot \\ & \cdot d e_{2_2} \cdot d L_{cp} \cdot d I_p \cdot d r_k \cdot d n \cdot \int_1^{12} \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} \varphi(B_{3_2}) \cdot \varphi_{at}[(e_{3_2} - a_3) - e_{3_2}] \cdot \\ & \cdot d e_{3_2} \cdot d L_{cp} \cdot d I_p \cdot d r_k \cdot d n \end{aligned} \quad (30)$$

Для схемы радиальной топологии имеем:

$$\begin{aligned} v = & \int_1^{12} K_{\text{загр}}(t_1) dt_1 \cdot \int_1^{12} \theta_{\text{окр.сред.}}(t_2) dt_2 \cdot \int_1^{12} T_{\text{рабоч.}}(t_3) dt_3 \cdot \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} R_{\text{эКВ}}(L_{cp}, I_p, r_k, n) \cdot \\ & \cdot d L_{cp} \cdot d I_p \cdot d r_k \cdot d n \cdot \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} \Delta P(L_{cp}, I_p, r_k, n) \cdot \\ & \cdot d L_{cp} \cdot d I_p \cdot d r_k \cdot d n \cdot \int_0^{100} \int_0^{75} \int_0^{0,19} \int_0^{10} \Delta W(L_{cp}, I_p, r_k, n) \cdot \\ & \cdot d L_{cp} \cdot d I_p \cdot d r_k \cdot d n \end{aligned} \quad (31)$$

Вычислим значение v :

$$\begin{aligned}
 v = & \int_1^{12} \frac{1}{0,17\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t_1-0,73)^2}{0,05}} \cdot dt_1 \cdot \int_1^{12} \frac{1}{3,32\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t_2-8)^2}{242}} \cdot dt_2 \cdot \\
 & \cdot \int_1^{12} \frac{1}{28\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t_3-840)^2}{1568}} \cdot dt_3 \cdot \\
 & \cdot \left[\int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} (1,18 \cdot 10^{-3} \cdot L_{cp} \cdot \frac{1}{n} + 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot L_{cp} \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n} + r_k \cdot \frac{1}{n}) \cdot \right. \\
 & \cdot dL_{cp} \cdot dI_p \cdot dr_k \cdot dn \cdot \\
 & \cdot \int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} (3,54 \cdot 10^{-3} \cdot I_p^2 \cdot L_{cp} \cdot \frac{1}{n} + 1,26 \cdot 10^{-7} \cdot L_{cp} \cdot I_p^4 \cdot \frac{1}{n} + 3 \cdot r_k \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n}) \cdot \\
 & \cdot dL_{cp} \cdot dI_p \cdot dr_k \cdot dn \cdot \\
 & \cdot \int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} \int_0^{100750,1910} (14,2 \cdot I_p^2 \cdot L_{cp} \cdot \frac{1}{n} + 5,1 \cdot 10^{-4} \cdot L_{cp} \cdot I_p^4 \cdot \frac{1}{n} + 12,1 \cdot 10^{-3} \cdot r_k \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n}) \cdot \\
 & \cdot dL_{cp} \cdot dI_p \cdot dr_k \cdot dn
 \end{aligned} \tag{32}$$

В результате вычислений $v_p=0,754$ - для цеховой схемы радиальной топологии, $v_m=0,750$ - для магистральной схемы, $v_c=0,723$ - для схемы смешанного типа.

Определим вероятность $v(t_1, t_2, t_3)$ для случая характеристики работоспособности внутрицеховой сети одним рабочим параметром "а" с учетом того, что для случайных величин "а" и "в" принято нормальное распределение параметров.

$$v(t_1, t_2, t_3) = 1 - \Phi \left\{ \frac{M[a] - M[b]}{\sqrt{D[a] - D[b]}} \right\} \tag{33}$$

где $M[x]$ - значение математического ожидания;

$D[x]$ - дисперсия x

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-y} \exp \left[-\frac{z^2}{2} \right] dz \tag{34}$$

значение функции с учетом интеграла вероятности: (34)

$$\Phi(y) = 0,50 - 0,50 \cdot S \cdot \frac{y}{\sqrt{2\pi}} \tag{35}$$

Определим $R_{эКВ}$ [2] для различного вида схем, $R_{эКВ}$ - характеристика работоспособности исследуемых схем.

1) схема радиальной топологии:

$$\begin{aligned}
 R_{эКВ} = f(n, L, I_p, r_k) = & 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot L_{cp} \cdot \frac{1}{n} + 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot L_{cp} \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n} + \\
 & + r_k \cdot \frac{1}{n};
 \end{aligned} \tag{36}$$

2) магистральная схема (распределительный шинопровод):

$$\begin{aligned}
 R_{эКВ} = f(n, L, I_p, r_k) = & 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot L_{cp} + 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot L_{cp} \cdot \frac{1}{n} + \\
 & + 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot L_{cp} \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n} + r_k \cdot \frac{1}{n};
 \end{aligned} \tag{37}$$

3) радиально-магистральная схема:

$$\begin{aligned}
 R_{эКВ} = f(n, L, I_p, r_k) = & 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot L_{cp} \cdot \frac{1}{n} + 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot L_{cp} \cdot \frac{1}{n^2} + \\
 & + 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot L_{cp} \cdot I_p^2 \cdot \frac{1}{n^2} + r_k \cdot \frac{1}{n^2};
 \end{aligned} \tag{38}$$

Вычислим для исследуемых схем значение вероятности функционирования для оптимальных режимов с учетом влияния внешних параметров на $R_{эКВ}$.

Определим величину изменений интенсивностей внешних параметров с учетом условия вероятностей функционирования схем.

$$\frac{t_{\max}}{t_{\text{пред}}} \leq 1 - \delta_{\text{опред}} \sqrt{21n \frac{\delta_{\text{опред}}}{\sqrt{2\pi \cdot Q_y}}} \quad (39)$$

где $Q_y = 1 - v$ величина вероятности функционирования системы в неоптимальном, для заданных условий эксплуатации, режиме.

$$\delta'_{\text{опред}} = \frac{\sqrt{D[A]}}{M[A] - M[D]};$$

где $t_{\max}$ – максимальная величина интенсивности влияния внешних параметров;

$t_{\text{предельн}}$ – значение предельной интенсивности влияния внешних параметров на $R_{\text{экв}}$.

Результаты проведенных вычислений показаны в таблице.

Расчет параметров для распределительного шинопровода, радиальной и радиально-магистральной схем

Интенсивность внешнего воздействия			Вероятность функционирования в оптимальном режиме, v			Доля изменения интенсивности внешнего воздействия, $\frac{t_{\max}}{t_{\text{пред}}}$		
$K_{\text{заср}}$	$\theta_{\text{окр.ср.ед.}}$	$T_{\text{работ}}$	Радиальная схема	Шинопровод	Радиально-магистральная схема:	Радиальная схема	Шинопровод	Радиально-магистральная схема:
0,3-1,3	5-35	83-416	0,725	0,713	0,659	0,850	0,870	0,890
0,5-1,0	5-15	167-250	0,776	0,762	0,734	0,820	0,837	0,837
0,5-1,3	5-25	85-410	0,751	0,733	0,720	0,839	0,869	0,868

Заключение

При известных интервалах изменения факторов (показаны численные значения в третьей строке таблицы 1) для сохранения значения вероятности, равной 0,659, работоспособность смешанной (радиально-магистральной) схемы при оптимальных режимах соответствует увеличению приблизительно на 12,5% максимально возможной интенсивности в эксплуатационных условиях внутрицехового электроснабжения.

Если интервал изменения внешних факторов уменьшить в 2 раза (численные значения четвертой строки), работоспособность схемы в оптимальных режимах обеспечивается с учетом интенсивности внешних факторов, увеличенной на 19,5% относительно максимальной возможной интенсивности. С увеличением (уменьшением) интервалов изменения внешних факторов уменьшается (увеличивается) их допустимая интенсивность по отношению к максимальному значению интенсивности для различных режимов работы оборудования. Применение вероятностных методов позволяет учитывать динамику основных параметров систем внутризаводского электроснабжения при оценке эффективности их функционирования. Проведенные исследования показывают изменение характеристик работоспособности таких систем в зависимости от интервалов варьирования внешних факторов в условиях эксплуатации. Полученные результаты позволяют рекомендовать применение разработанных моделей для эффективного управления схемными и режимными параметрами электрических сетей низкого напряжения для повышения качества электроснабжения потребителей.

Литература

1. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С.65-74.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.

4. Грачева Е.И., Наумов О.В. Уточнение величины эквивалентного сопротивления цеховых сетей // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 3. С.34-36
5. Садыков Р.Р. влияние режимных и схемных параметров оборудования на эквивалентное сопротивление цеховых сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7-8. С.92-97.
6. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters // International Journal of Applied Research. 2015. № 24.
7. Конюхова Е.А. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий (теория и примеры). Издательство «Кнорус», 2016.
8. Конюхова Е.А. Экономико-математическая модель рабочей части системы электроснабжения объекта на среднем и низком напряжении. Электричество, 2018. № 9.
9. William H. Kersting Distribution System Modeling and Analysis. Second Edition.CRC Press, 2007.
10. Lasso, H., Ascanio, C., Guglia, M. A model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network //IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition:Latin America. 2006. p.1-6.
11. Виноградов А.В. Новые мультиконтактные коммутационные системы и построение на их базе структуры интеллектуальных распределительных электрических сетей // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 3 (20). С.7-20.
12. U.S. Energy Information Administration. "International Energy Outlook 2017". September 14, 2017. Доступно по: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484 \(2017\) pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484%20(2017)%20.pdf) Ссылка активна:17.02.2018)
13. Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow. RWE Annual Report (2017). Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft.
14. Busom N. et al. Efficient smart metering based on homomorphic encryption // Computer Communications. 2016. Т. 82. С.95-101.
15. Скоморохов П.И. Анализ воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного характера на эффективность функционирования систем электроснабжения / Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2019. Т. 25. № 4. Тамбов: Из-во ТГТУ, с.559-565.
16. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Т. 57. С. 302-318
17. Инновации и развитие. Россети // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Наумов Олег Витальевич – канд.техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет.

Горлов Алексей Николаевич – канд.техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электроснабжение», Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

Шакурова ЗумейраМунировна– канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gracheva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining energy losses in workshop networks. *Problems of Energy*. 2019;5:87-96.
2. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. analysis and estimation of power saving in systems of in-plant power supply. *Energy problem*. 2020;2:65-74.
3. Gracheva EI, Naumov OV. *Loss of electricity and the effectiveness of the operation of equipment workshop networks*. Monograph. ...М.: RUSAINS, 2017. 168 p.
4. Gracheva EI, Naumov OV. Specification of the equivalent resistance of shop networks *Reliability and safety of energy*. 2015;3:34-36.

5. Sadykov RR. influence of operating and circuit parameters of equipment on the equivalent resistance of shop networks. *News of higher educational institutions. Energy problem*. 2015;7-8:92-97.
6. Gracheva EI, Naumov OV, Sadykov RR. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters. *International Journal of Applied Research*. 2015;24.
7. Konyukhova EA. *Design of power supply systems for industrial enterprises* (theory and examples). Knorus Publishing House, 2016.
8. Konyukhova EA. Economic-mathematical model of the working part of the power supply system of an object at medium and low voltage. *Electricity*. 2018;9.
9. William H. Kersting *Distribution System Modeling and Analysis*. - Second Edition. CRC Press, 2007.
10. Lasso, H, Ascanio C, Guglia M. *A model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network*. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2006. pp.1-6.
11. Vinogradov AV. new multi-contact switching systems and building on their basis the structure of intelligent distribution electric networks. *Agrotechnika I energoobespechenie*. 2018;3 (20):7-20.
12. U.S. Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2017*. September 14, 2017. Available at: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484 \(2017\) pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484%20(2017)%20pdf) accessed to: 17.0.2018.
13. *Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow*. RWE Annual Report (2017). Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft.
14. Busom N. et al. Efficient smart metering based on homomorphic encryption. *Computer Communications*. 2016;82:95-101.
15. Skomorokhov PI. Analysis of the impact of negative network disturbances of a rapidly changing nature on the efficiency of the functioning of power supply systems. *Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2019; 25(4):559-565. Tambov: Because of TSTU.
16. Kabalci YA survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;57:302-318.
17. Innovation and development. Rossetti. *Electricity. Transmission and distribution*. 2017.

Authors of the publication

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Naumov – Kazan State Power Engineering University.

Alexey N. Gorlov – South-West State University, Kursk.

Zumeyra M. Shakurova – Kazan State Power Engineering University.

Поступило

16 февраля 2021г.

Отредактировано

04 марта 2021г.

Принято

04 марта 2021г.



ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕНЕРАТОРНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Е.П. Сафонов*, В.Я. Фролов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7294-1588> ,
safonov_ep@spbstu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ: Рассмотреть проблемы эксплуатации генераторных выключателей, в частности проблемы больших аperiodических составляющих токов КЗ и длительных задержек нуля тока. Провести анализ и предложить методы решения этих проблем. На основании анализа разработать схему замещения электростанции, которая должна продемонстрировать упомянутые проблемы и эффективность предложенных методов для решения этих проблем. МЕТОДЫ: Для моделирования переходных процессов в электрических цепях использовался программный пакет Matlab Simulink РЕЗУЛЬТАТЫ: Была предложена и разработана схема замещения электростанции позволяющая моделировать отключение токов подпитки короткого замыкания от синхронного генератора. Получены осциллограммы токов короткого замыкания, описывающие проблему большой аperiodической составляющей и задержки нуля токов. Предложено решение о шунтировании механических контактов генераторного выключателя шунтирующей тиристорно-позисторной приставки. В рамках схемы замещения была разработана модель позисторной приставки. Продемонстрированы осциллограммы токов короткого замыкания, демонстрирующие демпфирование аperiodической составляющей от позисторного эффекта ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Результаты моделирования показали, что эффект длительных задержек нуля тока (когда ток не переходит нуль при ближайшем его минимуме) не характерен для мощных синхронных генераторов. Данный эффект может возникать при работе синхронного генератора в режиме компенсатора реактивной мощности и если при это отсутствует какое-либо дополнительное демпфирующее сопротивление. Применение позисторного эффекта в контактно-тиристорном генераторном выключателе позволяет снизить энергию тока КЗ на ~25% и полностью обезопасить выключатель от пропуска нулей тока. Это позволит повысить надежность эксплуатации тиристорного шунта.

Ключевые слова: короткое замыкание, генераторный выключатель, позистор, аperiodическая составляющая, задержка нуля тока, тиристор.

Для цитирования: Сафонов Е.П., Фролов В.Я. Особенности переходных процессов в генераторных цепях мощных электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С.105-118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-105-118.

FEATURES OF FAULT TRANSIENTS IN GENERATOR NETWORK OF POWERFUL ELECTRIC POWER STATIONS

EP. Safonov*, VYa Frolov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7294-1588> ,
safonov_ep@spbstu.ru

Abstract: THE PURPOSE. To consider the problems of generator circuit breaker. To consider the problems of high degree of asymmetry of short-circuit current and long delayed current zeros

in detail. Propose methods for solving these problems. Develop the equivalent electrical circuit model of electric power station. This model should demonstrate the above-mentioned problems and effectiveness of the proposed solving problems methods. **METHODS.** The fault transient's simulations have been performed by means of the software package Matlab Simulink. **RESULTS.** The equivalent electrical circuit model of electric power station was proposed and developed. This model allows simulating the short circuit currents from a synchronous generator. Short-circuit current waveforms are obtained. These waveforms describe the problem of high degree of asymmetry and long delayed current zeros phenomenon. Proposed decision on using thyristor-based hybrid circuit breaker with PTC-thermistor-based current limiting device. For equivalent electrical circuit the PTC-thermistor model was developed. Short-circuit current waveforms when applying PTC-thermistor-based current limiting device are obtained. **CONCLUSION.** The simulation results showed that the effect of long delayed current zeros (when the current does not pass zero at its nearest minimum) is not typical for high-power synchronous generators ($P_{SG} > 300$ MW). This effect can occur when the synchronous generator is operating in the reactive power compensation mode. At the same time, there should be no additional electric resistance (for example a gas electric arc). The use of PTC-thermistor for thyristor-based hybrid circuit breaker will reduce energy of short circuit current on ~25% and it will completely protect the circuit breaker from does not pass zero current. This will increase reliability of thyristor device for hybrid generator circuit breaker.

Keywords: short circuit; generator circuit breaker; PTC thermistor; aperiodic component; delayed current zeros.

For citation: Safonov EP, Frolov VYa. Features of fault transient's in generator network of powerful electric power stations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):105-118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-105-118.

Введение

Мировая тенденция повышения эффективности передачи электроэнергии и введение большого объема генерации от зеленой энергетики требует повышения гибкости управления всего энергетического комплекса [1, 2]. Важным аспектом этих мероприятий является необходимость к повышению частоты ввода и вывода генераторных агрегатов в работу с энергосистемой (ЭС) [3, 4]. Данное обстоятельство требует разработки новых генераторных выключателей (ГВ) с повышенной коммутационной износостойкостью при больших номинальных токах - 10-20 кА. Данная проблема особенно ярко выражена для ГАЭС и АЭС. Первая характеризуется относительно других типов электростанций высокой частотой коммутации генераторов, а вторая требует повышенной надежности при максимально высоких номинальных токах из-за высокой мощности энергоблоков.

Помимо высоких номинальных токов, эксплуатация генераторного выключателя также характеризуется рядом других проблем:

- Значительная продолжительность аperiodической составляющей тока КЗ СГ из-за особенности взаимодействия обмоток статора и индуктора;
- Высокие уровни максимальных токов КЗ от внешней энергосистемы;
- Включение СГ в противофазу с внешней ЭС;
- Большая скорость переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) при отключении КЗ в генераторной сети;

Всё это требует усложнения конструкции выключателя - повышение числа ступеней коммутации, применение предвключаемых и шунтирующих резисторов и т.д. В свою очередь это приводит к усложнению конструкции, тем самым снижая надежность эксплуатации выключателя.

Рассмотрим подробнее причины возникновения этих особенностей.

Источником возникновения первой проблемы является условия работы генератора непосредственно перед возникновением КЗ, а именно как много он потреблял или генерировал реактивной мощности [5]. Особенность зависимости величины аperiodической составляющей от потребляемой генератором реактивной мощности заключается в продольной намагничивающей реакции якоря [6]. Чем больше генератор потребляет реактивной мощности – тем больше аperiodическая составляющая токов КЗ генератора.

Для пояснения механизма данного явления на время предположим, что сопротивление обмотки возбуждения, якоря и демпфирующей обмотки (роль демпфирующей обмотки СГ выполняет массивное тело ротора) равно нулю. Согласно

теореме о постоянстве потокосцеплений, потокосцепление между упомянутыми обмотками должно оставаться неизменным после возникновения КЗ на генераторе. Следовательно, для поддержания постоянства потокосцепления после КЗ, в фазах обмотки должны возникать постоянные (или апериодические, если сопротивление обмоток не равно нулю) токи. Одним из условий для сохранения постоянства потокосцеплений как раз является совпадение магнитных потоков ротора и статора при намагничивающей реакции якоря [6].

В свою очередь потребление и генерация реактивной мощности генератором зависит от условий загрузки высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) и параметров нагрузки потребителей или, иными словами, от параметров энергосистемы. При недогруженной ЛЭП, она является источником реактивной мощности и чем длиннее эта линия, тем большее количество этой мощности она генерирует.

Проблема апериодических составляющих и задержки нуля тока для отключения токов КЗ от ЭС не характерна т.к. повышающий трансформатор эффективно подавляет апериодическую составляющую токов подпитки КЗ от соседних СГ на электростанции [7].

Причина второй особенности относительно проста. Главными источниками токов КЗ со стороны внешней ЭС являются расположенные на этой же электростанции другие СГ [8]. т.к. для экономии ресурсов на одной электростанции стараются расположить как можно больше генерирующих агрегатов, то токи от внешней ЭС будут являться максимально возможными для мощных электростанций. Именно эти токи должны определять электродинамическую устойчивость оборудования генераторного напряжения.

Причиной возникновения третьей проблемы является включение генератора в момент сдвига фаз напряжения относительно подключаемой ЭС на 180 градусов [9]. В результате между СГ и ЭС возникают значительные уравнивающие токи, вызывающие на валу генератора значительные усилия. Отметим, что ток отключения генератора в таком режиме также могут иметь длительные задержки нуля тока. Рассмотрения данного режима работы для ГВ не является актуальной задачей, т.к. современные мощные электростанции имеют высокую степень ответственности за повреждение эксплуатируемого оборудования и для предотвращения возможности возникновения данного режима применяются относительно несложные, не требующих больших материальных затрат методы - метод точной синхронизации (использования специального синхронизирующего оборудования) и метод самосинхронизации (включение СГ в сеть без возбуждения) [10].

Источником четвертой проблемы является высокая величина отключаемого тока КЗ и обмотка НН повышающего трансформатора [11]. Из-за небольшого количества витков напряжение на фазу НН может составлять всего ~3-5 нФ [12]. Наличие этой ёмкости и определяет высокую начальную скорость ПВН при отключении КЗ в генераторной сети.

Наиболее критической проблемой является первая – значительные апериодические составляющие увеличивают время задержки нуля тока, тем самым увеличивая время горения дуги на контактах ГВ. В совокупности с большими значениями токов КЗ это вызывает значительную дуговую эрозию контактов, приводящую к сокращению коммутационного ресурса выключателя [13]. Именно первой проблеме посвящен материал статьи.

Эффективным методом уменьшения времени горения дуги является шунтирование механических контактов полупроводниковыми тиристорными или транзисторными устройствами [14, 15]. При размыкании контактов загорается электрическая дуга, под действием напряжения которой ток переходит из дугогасительного устройства выключателя в тиристорную приставку за относительно небольшое время, за которое не должно происходить значительного разрушения контактов. Далее ток в тиристорах переходит через нуль. Произошло успешное срабатывание выключателя. Ключ из транзисторов будет работать аналогичным образом, за исключением того что ему не нужно дожидаться нуля тока. Однако использование обоих типов полупроводниковых устройств может столкнуться с проблемой излишней стоимости их сборок. Сборка мощного тиристорного ключа будет весьма дорогостоящей, где для подавления апериодической составляющей КЗ необходимо будет использовать дорогостоящие батареи противотока, в то время как сборка транзисторного ключа будет требовать больших затрат из-за всё еще относительно высокой стоимости самого транзистора.

Ранее рассмотренная особенность – большая апериодическая составляющая – требует дополнительных решений при использовании тиристорных. Дело в том, что сопротивление шунтирующего тиристорного ключа должно специально быть выбрано намного меньше чем сопротивление электрической дуги на контактах для обеспечения быстрого перехода тока в тиристоры с минимальным горением дуги на контактах. Относительно небольшое сопротивление тиристорных может значительно увеличить время

задержки нуля тока. Необходимо рассмотреть ввод дополнительного сопротивления в шунтирующую тиристорную ветвь ГВ.

Для этого в рамках данной работы предлагается использовать позисторное устройство, последовательно присоединенным к тиристорному ключу. Использование позисторного устройства позволит улучшить условия коммутации токов короткого замыкания для тиристорного ключа. Основой этого устройства является полупроводниковый материал с позисторным эффектом – несмотря на известный факт того, что полупроводники с повышением температуры уменьшают своё сопротивление, среди полупроводников находятся химические соединения с обратным эффектом, когда при повышении температуры сопротивление резко возрастает. В данном случае уместно говорить о фазовом переходе материала «металл-диэлектрик» [16]. Основания идея применения позисторов заключается в следующем – протекающие по тиристорно-позисторной ветви ГВ токи КЗ разогреют позисторную приставку, увеличивая ее сопротивление, тем самым демпфируя апериодическую составляющую тока КЗ.

Наиболее распространенным позисторным материалом является титанат бария (BaTiO_3), преимущественно используемый в электронике в качестве защиты электрических компонентов устройства от токов перегрузки. Однако данный материал не подходит для рассматриваемого применения из-за высокого удельного сопротивления до фазового перехода «металл-диэлектрик» - порядком 100 Ом/см. Для сборки такого позисторного устройства для выключателя, которые способно было бы обеспечивать хотя бы равное с электрической дугой сопротивление до фазового перехода, будет необходимо использовать очень большое количество материала с множеством параллельных соединений. В этом плане гораздо выгоднее использовать другой позисторный материал, такой как оксид ванадия 3 (V_2O_3). Удельное сопротивление данного материала гораздо меньше чем у BaTiO_3 и составляет порядком 0.001 Ом/см до фазового перехода, что дает большую выгоду по количеству используемого материала [17]. Также более плавная характеристика фазового перехода уменьшит риск перенапряжений на позисторном устройстве.

Одной из главных задач данной работы является разработка схемы замещения мощного генераторного блока электростанции, которая должна продемонстрировать проблему апериодической составляющей токов КЗ СГ, а также продемонстрировать эффективность предлагаемых технических решений.

Сначала необходимо выбрать топологию электростанции. Проблема отключения тока КЗ СГ является наиболее критичной, т.к. мощность и продолжительность горения дуги будут отвечать за коммутационный ресурс разрабатываемого ГВ. В наибольшей степени эти проблемы проявляются для генераторов высокой мощности – несколько сотен МВ. Для таких мощных агрегатов характерно блочное соединение генераторов с трансформаторами, как это показано на рис 1.

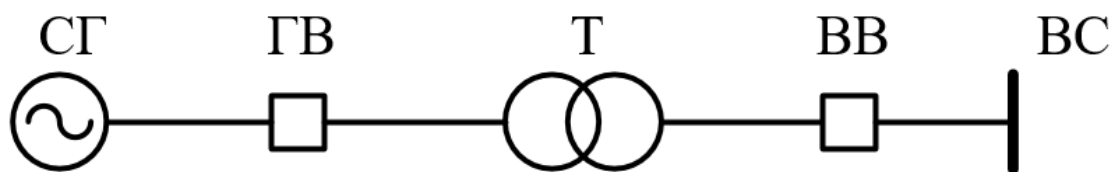


Рис 1. Блочное соединение генераторов с трансформаторами (СГ – синхронный генератор, ГВ – генераторный выключатель, Т – повышающий трансформатор, ВВ – высоковольтный выключатель, ВС – внешняя энергосистема)

Fig.1. Block connection of generators with transformers (SG-synchronous generator, GV-generator switch, T-step-up transformer, BB-high-voltage switch, VS-external power system)

До какого-то времени ГВ не использовались на ЭС, тем самым ранее функция защиты оборудования на ЭС от воздействия токов КЗ возлагалась на ВВ. Однако увеличение мощности применяемых СГ потребовало увеличить степень надежности эксплуатации генераторного оборудования. Прежде всего ГВ необходим для защиты повышающего трансформатора от токов КЗ. Дело в том, что в случае перекрытия обмотки НН или ВН повышающего трансформатора срабатывание ВВ не предотвращает аварию, т.к. КЗ будет подпитываться от СГ, отключение тока которого (в случае отсутствия ГВ) будет зависеть от времени срабатывания автомата гашения поля (АГП), что может происходить весьма длительно - в течении 2-10 с. За это время, с большой вероятностью, повышающий трансформатор может выйти из строя. В данной ситуации установка ГВ позволит быстро

отключить поврежденный трансформатор от СГ за время порядка 100 мс. Отметим, что быстрое отключение КЗ позволит предотвратить случаи развития КЗ - переход от однофазного КЗ к двухфазному и к трехфазному КЗ.

Помимо вышесказанного, применение ГВ позволит увеличить степень надежности питания собственных нужд СГ. В случае аварии на статорной обмотке СГ срабатывание ГВ не обесточит собственные нужды, которые будут продолжать питаться через повышающий трансформатор. Такая логика построения ЭС особенно характерна для АЭС, где надежность питания цепи собственных нужд имеет важное значение.

Исходя из анализа исследуемой проблемы, компонентов разрабатываемого ГВ и топологии мощных электростанций, в следующем разделе будет предложена и разработана схема замещения электростанции для изучения проблемы коммутации ГВ трехфазный токов КЗ СГ

Материалы и методы

В совокупности вышесказанного, общая схема замещения будет выглядеть следующим образом:

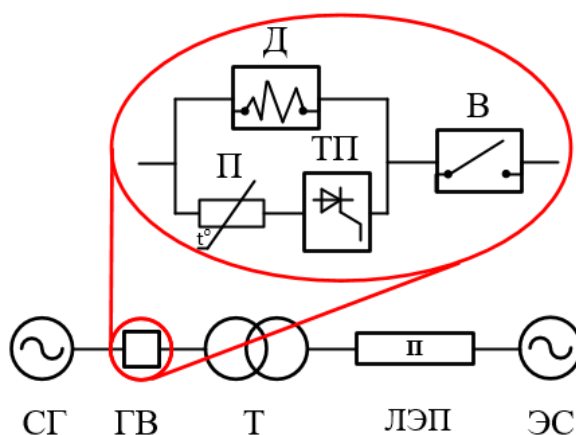


Рис 2. Схема замещения блока электростанции
Fig.2. Power plant block replacement scheme

На рис 2. Т – повышающий трансформатор энергоблока; ЛЭП – высоковольтная линия электропередач; ГВ состоит из следующих компонентов: Д – блок, моделирующий горение электрической дуги на разомкнутых контактах выключателя; П – позисторное устройство; ТП – тиристорная приставка со встречно-параллельным соединением ключей; В – последовательно присоединенный размыкатель.

В рамках данного примера будет моделироваться блок с СГ ТВВ-500-2У3. Повышающий трансформатор – ТЦ630000/500. Напряжение генераторной сети – 20 кВ. Напряжение высоковольтной сети – 500 кВ. ЛЭП моделируется в виде П-образной схемы замещения.

Параметры внешней ЭС и ЛЭП выбираются только исходя из получения нужного режима генерации/выдачи реактивной мощности для СГ. Потребление и генерация реактивной мощности генератором зависит от условий загрузки линий электропередач и параметров нагрузки потребителей или, иными словами, от параметров энергосистемы. При недогруженной ЛЭП, она является источником реактивной мощности и чем длиннее эта линия, тем большее количество этой мощности она генерирует. Одна часть этой мощности потребляется СГ, другая – энергосистемой. Здесь уже оказывает влияние соотношение реактивного сопротивления генерирующей подстанции и потребителя. Если реактивное сопротивление потребителей сильно ниже реактивного сопротивления генерирующей станции, то избыток реактивной мощности линий будет потребляться внешней энергосистемой, и наоборот.

Показанная на рис 2. схема замещения будет моделироваться в программном пакете Matlab Simulink.

Для моделирования СГ был использован функциональный блок «Synchronous Machine». Трансформатор ТЦ-630000/500 моделируются блоком «Three-Phase Transformer (Two Windings)». Энергосистема моделируется трехфазными источниками напряжения «Three-Phase Source». Нагрузка моделируется активным сопротивлением 5 Ом и

индуктивностью 300 мГн. ЛЭП 500 кВ моделируется блоками «PI Section Line». Длина линии – 400 км. Параметры для этих блоков были взяты из справочных материалов [18].

Для моделирования перехода тока с механических контактов в тиристорную приставку в модели используется модель дуги КЕМА. Основа блока, моделирующего напряжения на дуге между механическими контактами, является модель дуги КЕМА [19]:

$$\begin{cases} \frac{dG_i}{dt} = \frac{1}{\Pi_i T_i} G_i^\lambda U_i^2 - \frac{1}{T_i} G_i, & i=1,2 \\ G = \frac{I}{U} \\ U = \sum_{i=1}^3 U_i \end{cases} \quad (1)$$

Здесь I , G и U – ток, проводимость и напряжение электрической дуги соответственно. Остальные параметры и коэффициенты (Π , T , λ) являются экспериментальными значениями, зависящие от конструкции отдельного выключателя. Система уравнений и параметры для нее были взяты из [19]. В модели *Matlab Simulink* напряжение дуги моделируется источником напряжения «Controlled Voltage Source», управляемый системой уравнения (1). Взятые параметры обеспечивают напряжение на дуге величиной ~500 В. Пример получаемой формы напряжения на электрической дуге на контактах СГ показано на рис. 3.

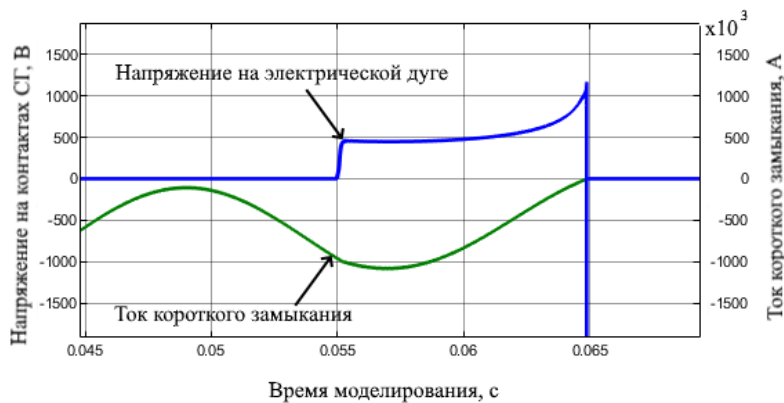


Рис. 3. Осциллограмма напряжения используемой в схеме замещения модели электрической дуги

Fig.3. Voltage waveform of the electric arc model used in the replacement circuit

Как и было указано ранее, для увеличения коммутационной способности ГВ необходимо ограничить время горения дуги. Наиболее выгодным решением данной проблемы является шунтирование механических контактов ГВ встречно-параллельными тиристорными ключами. Модель тириستоров максимально упрощена. Единственная ее функция – это размыкание фазы в момент перехода тока через нуль. Но сопротивление тиристорного ключа (1 колонка на 20 кВ) будет составлять примерно ~1 мОм что в 5-10 раз меньше сопротивления электрической дуги в газе. При таких обстоятельствах проблема апериодической составляющей всё еще актуальна и требует технического решения в виде позисторного устройства, последовательно присоединенной к тиристорному ключу.

Блок-схема реализованного в схеме замещения алгоритма изменения электрического сопротивления позисторного устройства продемонстрирована на рис 4. Позистор, как и модель дуги, реализован источником напряжения «Controlled Voltage Source».

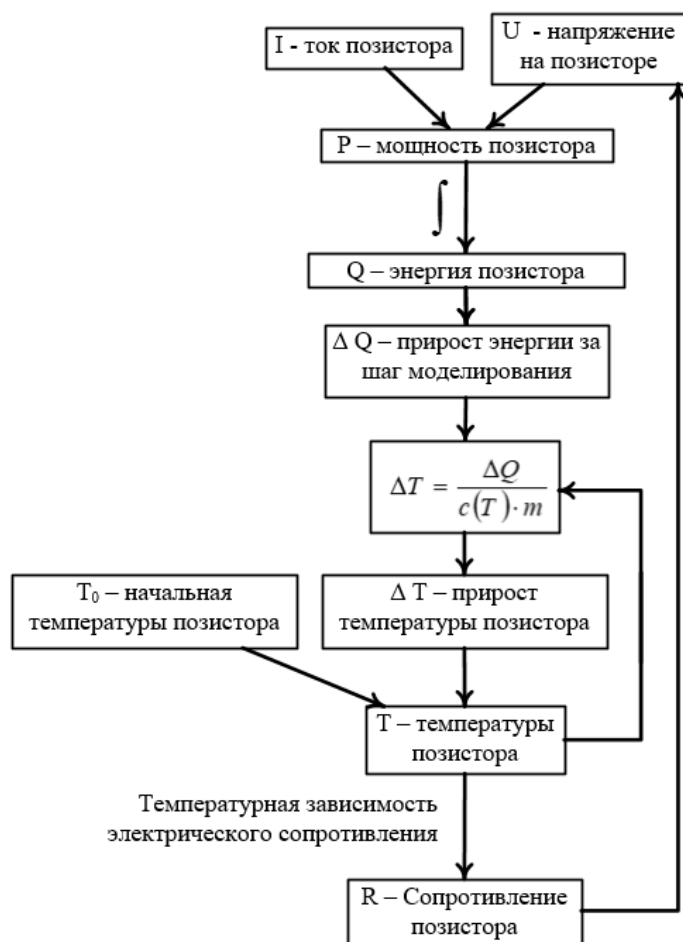


Рис 4. Блок-схема реализации позисторной приставки
Fig.4. Block diagram of the implementation of the posistor set-top box

Молярная теплоёмкость оксида ванадия (3) претерпевает некоторые изменения по мере фазового перехода и зависит от величины изменения энтропии, которая для оксида ванадия (3) равно $\Delta S = 7.5$ Дж/(моль·К) [20]. Используемая характеристика зависимости молярной теплоёмкости от температуры показана на рис. 5.

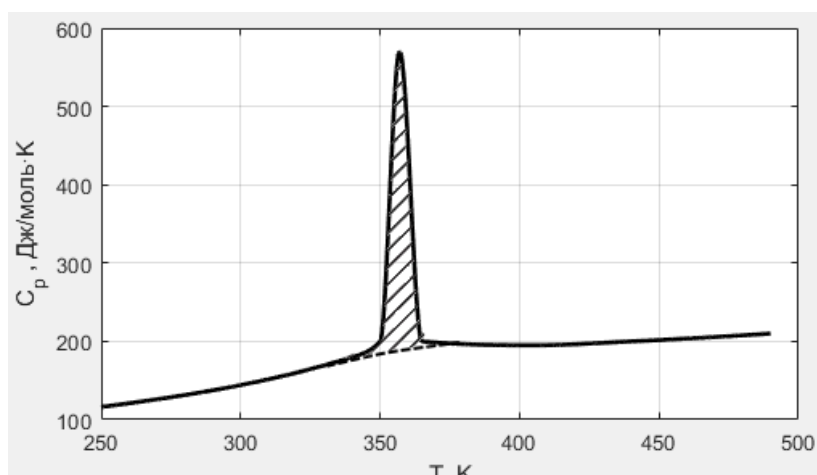


Рис. 5. Характеристика зависимости молярной теплоёмкости от температуры моделируемого образца позистора

Fig.5. Characteristic of the dependence of the molar heat capacity on the temperature of the modeled sample of the posistor

Расчёт заштрихованной области графика на рис.5. осуществлён следующим образом. Заштрихованная область по вертикали делится на небольшие участки шириной ΔT и ΔS рассчитывали как сумму приведенных значений теплоты $\sum (C_p \cdot \Delta T / T_i)$, где T_i – температура соответствующего интервала ΔT [20]. В данной работе для удобства сделано предположение синусоидальной огибающей зависимости $C_p(T)$ при фазовом переходе.

Характеристика зависимости удельного сопротивления оксида ванадия (3) от температуры была взята из работы и показана на рис.6 [21].

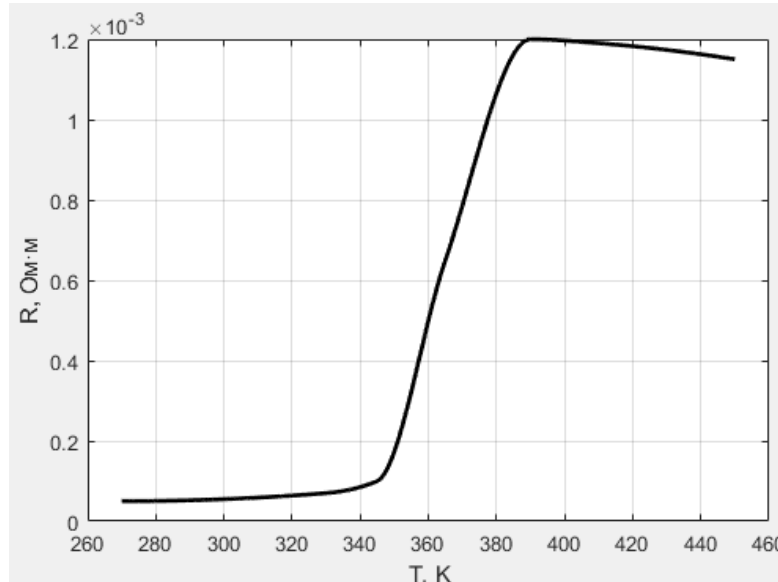


Рис. 6. Зависимость удельного сопротивления оксида ванадия (3) от температуры
Fig.6. Dependence of the specific resistance of vanadium oxide (3) on the temperature

На рис. 7. показана реализованная в Matlab Simulink схема замещения из рис. 2.

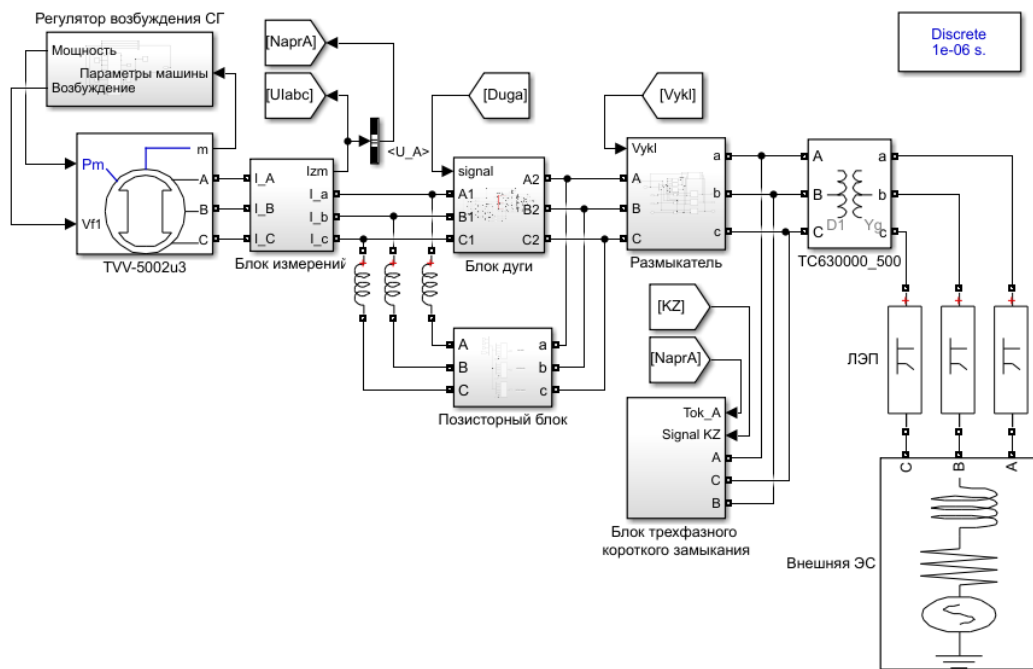


Рис 7. Исследуемая схема Matlab Simulink
Fig.7. The Matlab Simulink scheme under study

Сам процесс моделирования отключения ГВ токов трехфазного КЗ от СГ происходит следующим образом. «Блок трехфазного короткого замыкания» получает сигнал на

трехфазное замыкание и начинает ожидать нуля напряжения в фазе А, т.к. при этом в этой фазе будет наблюдаться максимальная апериодическая составляющая тока КЗ. Далее, после инициализации КЗ, спустя время в 40-60 мс (предполагаемое время задержки с момента сигнала релейной защиты до начала размыкания механических контактов) «Блок дуги» вводит в генераторную сеть напряжение дуги, под действием которой ток КЗ переходит в «Позисторный блок». Последовательно этому блоку пофазно установлены небольшие индуктивности в 5 нГн, моделирующие паразитные индуктивности шин и проводов. Далее позисторный блок под действием сверхтоков увеличивает своё сопротивление, тем самым условно улучшая условия коммутации для последовательно установленной тиристорной приставки. Последним срабатывает блок «Размыкатель», который моделирует работу тиристорной приставки. Установка этого блока последовательно, в отличие от схемы на рис. 2, не повлияет на результаты моделирования и лишь повышает удобство моделирования (как упоминалось ранее, тиристорный блок «размыкатель» предназначен только для окончательного размыкания генераторной цепи).

Результаты и обсуждение

Как можно увидеть из результатов моделирования (рис. 8 и рис. 9) длительные задержки нуля тока ($t_d > 15$ мс) на практике должны встречаться довольно редко. Дело в том, что режимы потребления реактивной мощности у СГ имеют строгие ограничения, связанные с дополнительным нагревом активной стали и конструктивных элементов торцевых зон статора, бандажных колец лобовых частей обмотки возбуждения, торцевых щитов корпуса генератора. Например, генераторы серии ТВВ могут вырабатывать до 80% реактивной мощности по отношению к активной, а потреблять только до 30-40% при ограничении активной мощности до 40%. Только в режиме работы СГ близких к режиму синхронного компенсатора (СГ не выдает в ЭС активной мощности) при КЗ могут возникать длительные задержки нуля тока с непересечением тока нуля (рис. 10). Однако, при присутствии сопротивления электрической дуги газовых дугогасительных устройств, ток достигнет нуля при ближайшем его минимуме. С другой стороны, при работе СГ в режиме генерации реактивной мощности, когда наблюдается размагничивающая реакция якоря, это не оказывает большого влияния на эффект задержки нуля тока.

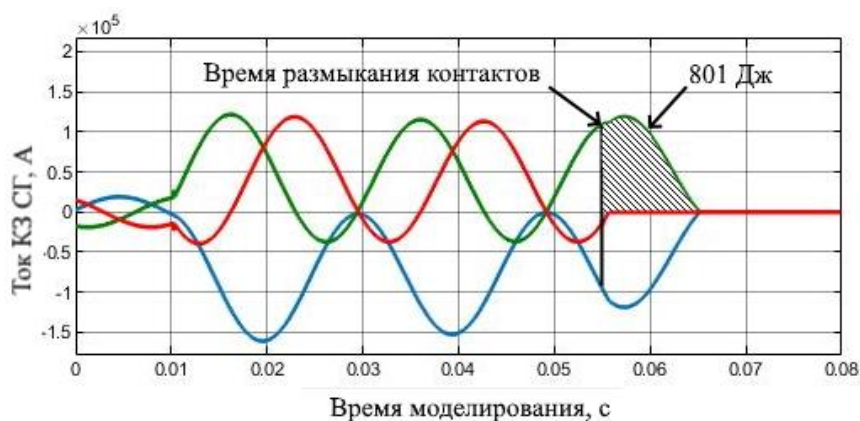


Рис 8. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ генерации реактивной мощности (без влияния дуги, $P = 450$ МВт, $Q = 300$ МВА)

Fig.8. Waveforms of the three-phase short-circuit current in the SG mode of reactive power generation (without arc effect, $P = 450$ MW, $Q = 300$ MVA)

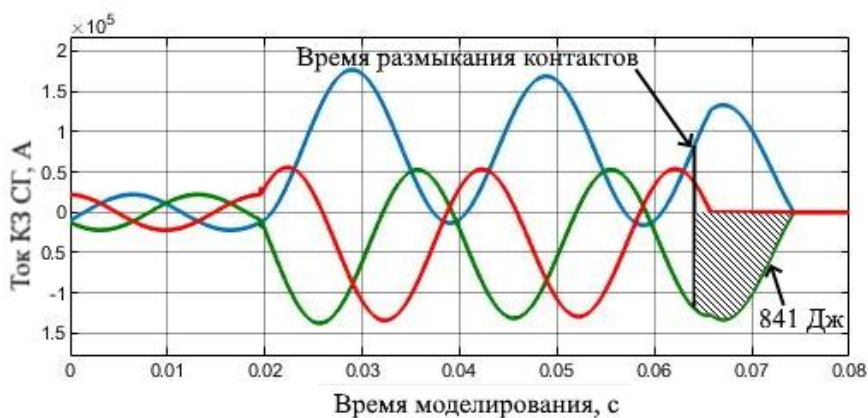


Рис 9. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ потребления реактивной мощности (без модели электрической дуги, $P = 450$ МВт, $Q = -100$ МВА)

Fig.9. Waveforms of the three-phase short-circuit current in the SG mode of reactive power consumption (without electric arc model, $P = 450$ MW, $Q = -100$ MVA)

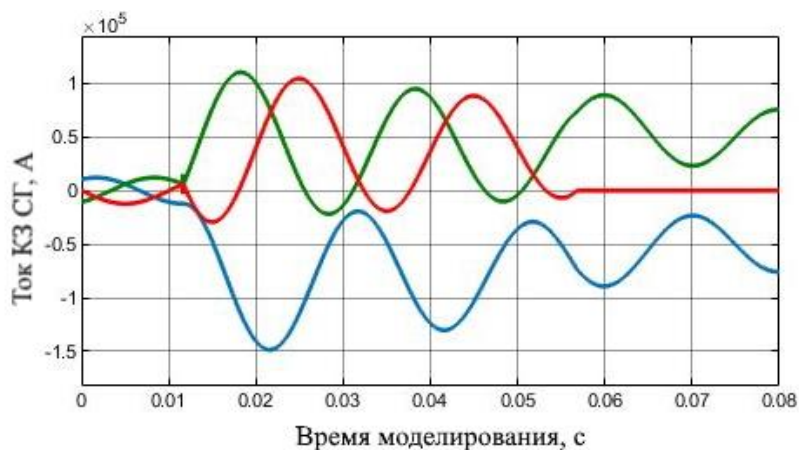


Рис 10. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ синхронный компенсатор (без модели электрической дуги, $P = 0$, $Q = -300$ МВА)

Fig.10. Three-phase short-circuit current waveforms in SG mode synchronous compensator (without electric arc model, $P = 0$, $Q = -300$ MVA)

Следующим этапом стало моделирование того же условного ГВ с модернизацией в виде дополнительных полупроводниковых устройств – тиристорного шунта электрической дуги и позисторный ограничитель аperiodической составляющей тока КЗ.

Для удобства проверки эффективности позисторного устройства, а также для проверки устойчивости тиристорного устройства к ударным токам, в работе будет использована величина энергии тока КЗ тиристора – $Q_{\text{кзт}}$. Например, для мощного тиристора максимально допустимый прямой ток I_{TSM} составит около 70 кА за 10 мс, т.е. $Q_{\text{кзт}}$ для такого тиристора составит 700 Дж. В модели эта величина будет рассчитана как интеграл от тока КЗ тиристорной приставки. Величина $Q_{\text{кзт}}$ указана на осциллограммах (рис. 7, рис. 8, рис. 10, и рис. 11). Необходимо ставить цель, что бы эта энергия при моделировании схемы замещения не превышала максимально допустимых значений для тиристора. Позисторное устройство должно уменьшить эту величину, тем это самым позволит использовать более дешевые тиристорные ключи и в меньшем объеме, а также избежать задержек нуля тока в тиристоре. Предполагаемое время горения дуги на контактах (время перехода тока с механических контактов в позисторную приставку) составляет примерно 100-200 мкс.

При сравнении соответствующих осциллограмм (рис.8 и рис.11, рис. 9 и рис. 12) можно увидеть влияние позисторной приставки при коммутации тока КЗ. Благодаря позисторному эффекту удалось уменьшить энергию тока КЗ тиристора для обоих случаев на ~25%.

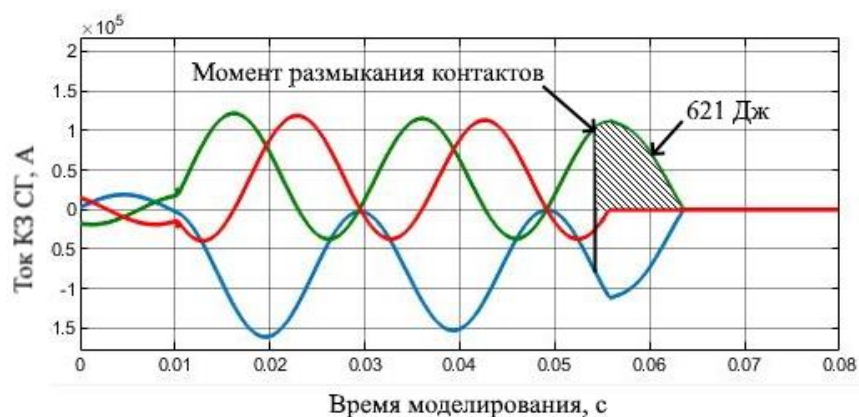


Рис 11. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ генерации реактивной мощности (присутствует модели электрической дуги и позистора, $P = 450$ МВт, $Q = 300$ МВА)

Fig.11. Waveforms of the three-phase short-circuit current in the SG mode of reactive power generation (there are models of an electric arc and a posistor, $P = 450$ MW, $Q = 300$ MVA)

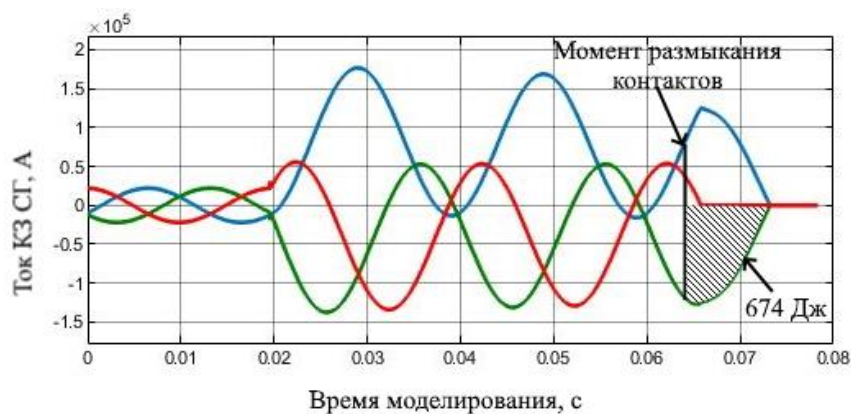


Рис 12. Осциллограммы тока трехфазного КЗ в режиме СГ потребления реактивной мощности (присутствует модели электрической дуги и позистора, $P = 450$ МВт, $Q = -100$ МВА)

Fig.12. Waveforms of the three-phase short-circuit current in the SG mode of reactive power consumption (there are models of an electric arc and a posistor, $P = 450$ MW, $Q = -100$ MVA)

Закключение

В работе был проведен анализ проблемы коммутации СГ трехфазных токов КЗ при наличии длительных и больших по значению аperiodических составляющих. Источник данной проблемы - продольная намагничивающая реакция якоря синхронной машины, вызванная потреблением реактивной мощности. Большая аperiodическая составляющая тока КЗ увеличивает время горения дуги и тем самым увеличивая дуговую эрозию контактов ГВ. Для решения этой проблемы было предложено применение шунтирующего тиристорно-позисторного устройства, способного значительно сократить время горения дуги. Шунтирование контактной системы позволит уменьшить время горения дуги до времени перехода тока из дугогасительного устройства в шунтирующую тиристорную приставку. Для уменьшения воздействия токов КЗ на тиристорный ключ, было предложено соединять последовательно тиристорному ключу токоограничитель на основе позисторного эффекта оксида ванадия (III). Исходя из всего этого, была предложена и разработана схема замещения электростанции с СГ. Для СГ в работе были представлены модели, симулирующие напряжение электрической дуги на контактах выключателя, а также модель устройства с позисторным эффектом.

Результаты моделирования показали, что эффект длительных задержек нуля тока (когда ток не переходит нуль при ближайшем его минимуме) не характерен для мощных СГ. Предположительно данный эффект может возникнуть в случае, когда СГ эксплуатируется в режиме синхронного компенсатора [22][23], и при этом его КЗ коммутирует вакуумный выключатель (низкое напряжение дуги) или шунтирующая тиристорная приставка без дополнительного ограничения аperiodической составляющей. Для СГ, которые эксплуатируются в нормальных режимах потребления реактивной

мощности, шунтирующее позисторно-тиристорное устройство позволит увеличить коммутационный ресурс ГВ при относительно небольших капитальных затратах на сборку тиристорного ключа.

Применение в СГ позисторного эффекта показало ограничения энергии трехфазного КЗ $Q_{кзт}$ на ~25%. Такой эффект позволит использовать меньшее число параллельных тиристорных сборок или уменьшить мощность самих тириستоров.

Литература

1. Харисова А.З. Повышение конкурентоспособности РФ: в новый век с новой энергией // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. №. 3 (35).
2. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Управление затратами на электропотребление по показателям волатильности спроса // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. №. 1 (33).
3. Савина Н.В., Сцепуро К.И. Реконфигурация схемы электрических сетей как средство снижения потерь электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. №. 2 (42).
4. Смоленцев Н.И., Четошников Л.М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №. 4.
5. Palazzo M., Braun D., Delfanti M. Investigation on the occurrence of delayed current zeros phenomena in power stations and related stress imposed on generator circuit-breakers // International Conference on Power Systems Transients IPST 2011. 2011.
6. Lim L.S., Smith I.R. Turbogenerator short circuits with delayed current zeros // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, 1977. Т. 124. №. 12. С. 1163-1169.
7. Urbanek H., Venna K.R., Anger N. Vacuum circuit breakers-Promising switching technology for pumped storage power plants up to 450 MVA // 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). IEEE, 2017. С. 107-112.
8. Зорин Л.М., Подъячев В.Н., Шлейфман И.Л. Генераторные выключатели в цепи мощных энергоблоков и требования, предъявляемые к ним // Электротехника. 2003. №. 11. С. 34-39.
9. Palazzo M., Delfanti M. New requirements for the application of generator circuit-breakers // International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). 2013
10. Schaefer R. C. Art of generator synchronizing // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Т. 53. №. 1. С. 751-757.
11. Palazzo M. et al. Revision of TRV requirements for the application of generator circuit-breakers // Electric Power Systems Research. 2016. Т. 138. С. 66-71.
12. Гусев Ю.П., Омокеева А.А. Анализ коммутационных процессов в цепях генераторного напряжения малых ГЭС // Электрические станции. 2012. №. 12. С. 33-39.
13. Vajnar V., Vostracky Z. Reduced breaking capability of circuit breakers within operations with delayed current zeros // 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2016. С. 1-5.
14. Кукеков Г.А., Фролов В.Я. Переходные процессы в контактно-тиристорных аппаратах. 1988.
15. Шульга Р.Н. и др. Исследование и разработка гибридного генераторного выключателя // Энергия единой сети. 2019. №. 3. С. 28-38. - ссылка при первом упоминании гибридного тиристорного выключателя
16. McWhan D.B. et al. Electronic specific heat of metallic Ti-doped V₂O₃ // Physical Review Letters. 1971. Т. 27. №. 14. С. 941.
17. Ковтуненко П. В., Беляков А. В., Фомин Н. Н. Материалы для позисторов. Формирование позисторного эффекта и нестехиометрия // Перспективные материалы. 2001. №. 2. С. 5-14.
18. Smeets R. P. P., Kertesz V. Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a new validated arc model // IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. 2000. Т. 147. №. 2. С. 121-125.
19. Лях О.В. и др. Структура, кинетические и теплофизические свойства чистого и легированного оксида ванадия (III) // Омский научный вестник. 2011. №. 3 (103).
20. Kokabi H.R. et al. Electrical characterization of PTC thermistor based on chromium doped vanadium sesquioxide // Materials Science and Engineering: B. 1996. Т. 38. №. 1-2. С. 80-89.

21. Шабад В.К., Саленик Д.В. Использование турбогенераторов в режиме потребления реактивной мощности // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. №. 4. С. 55-59.

23. Криволапов А. Ю., Мелешко Н. С., Степанова А. А. Использование генераторов в режиме синхронного компенсатора для регулирования уровней напряжения в энергосистеме // Электроэнергетика глазами молодежи-2019. 2019. С. 321-324.

Авторы публикации

Сафонов Евгений Павлович – аспирант, Высшая школа электроэнергетических систем, Институт энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия. e- mail: Eugen.Safonov.95@yandex.ru.

Фролов Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, Высшая школа электроэнергетических систем, Институт энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия. e-mail: frolov.eed@gmail.com.

References

1. Harisova AZ. Improving the competitiveness of the Russian Federation: into a new age with new energy. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;3:(35).
2. Solovyova IA, Dzyuba AP. Energy cost management based on demand volatility indicators. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;1:(33).
3. Savina NV, Scepuro KI. Reconfiguration of electrical networks to reduce energy losses. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019;11(2):(42).
4. Smolentsev NI, Chetoshnikova LM. Topology of the electrical network and the method of transmission of electrical energy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2019;21(4).
5. Palazzo M, Braun D, Delfanti M. *Investigation on the occurrence of delayed current zeros phenomena in power stations and related stress imposed on generator circuit-breakers*. International Conference on Power Systems Transients IPST 2011.
6. Lim LS, Smith IR. *Turbogenerator short circuits with delayed current zeros*. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, 1977;124(12):1163-1169.
7. Urbanek H, Venna KR, Anger N. Vacuum circuit breakers-Promising switching technology for pumped storage power plants up to 450 MVA. 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). IEEE, 2017. pp. 107-112.
8. Zorin LM, Podyachev VN, Shleifman IL. Generator circuit breaker for powerful power units and requirements for them. *Elektrotehnika*. 2003;11:34-39.
9. Palazzo M, Delfanti M. *New requirements for the application of generator circuit-breakers*. International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). 2013.
10. Schaefer RC. *Art of generator synchronizing*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2016;53(1):751-757.
11. Palazzo M. et al. Revision of TRV requirements for the application of generator circuit-breakers. *Electric Power Systems Research*. 2016;138:66-71.
12. Gusev YuP, Omakeeva AA. Analysis of switching processes in generator voltage circuits of small hydroelectric power plants. *Elektricheskiye stantsii*. 2012;12:33-39.
13. Vajnar V, Vostracky Z. *Reduced breaking capability of circuit breakers within operations with delayed current zeros*. 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2016.1-5.
14. Kukekov GA, Frolov VYa. *Transient processes in hybrid circuit breaker*. 1988.
15. Shul'ga RN, Lavrinovich VA, Ivanov VP, et al. Research and development of hybrid generator circuit breaker. *Energiya yedinoi seti*. 2019;3:28-38
16. McWhan D. B. et al. Electronic specific heat of metallic Ti-doped V₂O₃. *Physical Review Letters*. 1971;279(14):941.
17. Kovtunenkov PV, Belyakov AV, Fomin N.N. Materials for PTC-thermistor. Formation of the PTC-thermistor effect and non-stoichiometry. *Perspektivnyye materialy*. 2001;2:5-14.
18. Karapetyan I, Faibisovich D, Shapiro I. *Reference Book for the Design of Electrical Networks*. Litres, 2018.

19. Smeets RP, Kertesz V. Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a new validated arc model. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. 2000;147(2):121-125.

20. Lyah OV, Prokudina NA, Surikov VadI, et al. Structure, kinetic and thermophysical properties of pure and doped vanadium (III) oxide. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2011;3(103).

21. Kokabi H. R. et al. *Electrical characterization of PTC thermistor based on chromium doped vanadium sesquioxide*. Materials Science and Engineering: B. 1996;38(1-2):80-89.

22. Shabad VK, Salenik DV. The use of turbo generators in the mode of reactive power consumption. *Energoberezhniye i vodopodgotovka*. 2004;4:55-59.

23. Krivolapov AYu, Meleshko NS, Stepanova AA. Using generators in synchronous compensator mode to regulate voltage levels in the power system. *Elektroenergetika glazami molodezhi-2019*. pp. 321-324.

Authors of the publication

Safonov Evgeniy Pavlovich – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation. e-mail: Eugen.Safonov.95@yandex.ru

Frolov Vladimir Yakovlevich – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation.

Получено

14 января 2021г.

Отредактировано

11 февраля 2021г.

Принято

11 февраля 2021г.



ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ БИОМАССЫ И УГЛЯ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Е.С. Дремичева^{1*}, Э.Р. Зверева^{1**}, Ф.И. Бурганова¹, Л.О. Зверев²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Санкт-Петербургский университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологий и энергетики, г. Санкт-Петербург, Россия

*lenysha@mail.ru, **6elvira6@list.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Биоэнергетика направлена на производство топлива биологического происхождения альтернативного природному органическому топливу. Биотопливо получают из растительного или животного сырья, из продуктов жизнедеятельности организмов, из промышленных отходов, из отходов сельского хозяйства и т.д. В статье изучены свойства каменного угля Кузнецкого бассейна с твердотопливными композициями из местных видов топлива и отходами производства органической природы (биомассы), а также возможность их совместного сжигания в котлах малой и средней мощности. МЕТОДЫ. Для решения поставленных задач в научной статье были использованы расчетный и эмпирический метод исследования – эксперимент. Экспериментальные исследования были проведены в лабораториях кафедры «Технологии в энергетике и нефтегазопереработке» ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», в лабораториях филиала АО «Татэнерго» «Казанская ТЭЦ-1» и филиала ОАО ТКГ-16 «Казанская ТЭЦ-3». В качестве объектов исследования были выбраны: каменный уголь Кузнецкого угольного бассейна; торф месторождения Сосновое Республики Татарстан; древесные опилки, полученные после переработки лиственных пород деревьев; жмых из переработанных маслосемян на АО «Казанский маслоэкстракционный завод». В соответствии с действующими ГОСТ были определены влажность (ГОСТ Р 52911-2013), зольность (ГОСТ Р 55661-2013), и выход летучих веществ (ГОСТ Р 55661-2013) образцов топлив. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований по теплоте сгорания; зольности, выхода летучих продуктов в композиции топлив при их совместном сжигании. Рассчитаны экономия природного топлива и предотвращенный экологический ущерб атмосфере и почве при совместном сжигании твердотопливных композиций. Разработана схема совместного сжигания угля и биомассы с последующей комплексной очисткой образующихся вредных газов озонно-аммиачным методом. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Торф и древесные опилки, обладая достаточно высокой теплотой сгорания и малой зольностью, являются перспективным топливом, при их совместном сжигании с каменным углем, для котельных малой и средней мощности в районах с низкой газификацией. Применение местных топливных ресурсов, альтернативных видов топлива позволит сократить расход природного ископаемого топлива, повысить экологическую безопасность предприятий топливно-энергетического комплекса, малой энергетики, обеспечить устойчивый рост валового национального продукта.

Ключевые слова: биотопливо, торф, уголь, зольность, выход летучих, теплота сгорания, совместное сжигание, очистка дымовых газов.

Для цитирования: Дремичева Е.С., Зверева Э.Р., Бурганова Ф.И., Зверев Л.О. Перспективы технологии совместного сжигания биомассы и угля на объектах энергетики ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 119-130. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130.

PROSPECTS OF THE TECHNOLOGY OF JOINT COMBUSTION OF BIOMASS AND COAL AT ENERGY FACILITIES

ES. Dremicheva^{1*}, ER. Zvereva^{1**}, FI. Burganova¹, LO. Zverev²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Saint Petersburg University of Industrial Technology and Design, Graduate School of Technology and Energy, St. Petersburg, Russia

*lenysha@mail.ru, **6elvira6@list.ru

Abstract: *TARGET. PURPOSE.* Bioenergy is aimed at the production of biological fuels, alternative to natural fossil fuels. Biofuel is obtained from plant or animal raw materials, from the waste products of organisms, from industrial waste, from agricultural waste, etc. The article studies the properties of coal from the Kuznetsk Basin with solid fuel compositions from local fuels and organic waste (biomass), as well as the possibility of their co-combustion in boilers of low and medium power. *METHODS.* To solve the set tasks in the scientific article, a computational and empirical research method was used - experiment. Experimental studies were carried out in the laboratories of the Department of Technologies in Energy and Oil and Gas Processing of the Kazan State Power Engineering University, in the laboratories of the Kazan CHP-1 branch of Tatenergo and the Kazan CHP-3 branch of TKG-16. As objects of research were selected: coal of the Kuznetsk coal basin; peat from the Sosnovoye deposit of the Republic of Tatarstan; sawdust obtained after processing deciduous trees; cake from processed oilseeds at Kazan Oil Extraction Plant JSC. In accordance with the current GOST, humidity (GOST R 52911-2013), ash content (GOST R 55661-2013), and the yield of volatile substances (GOST R 55661-2013) of fuel samples were determined. The results of calculated and experimental studies on the heat of combustion are presented; ash content, the release of volatile products in the composition of fuels when they are co-fired. The saving of natural fuel and the prevented environmental damage to the atmosphere and soil during co-combustion of solid fuel compositions are calculated. A scheme has been developed for co-firing coal and biomass with subsequent complex purification of the resulting harmful gases by the ozone-ammonia method. *CONCLUSION.* Peat and sawdust, having a sufficiently high calorific value and low ash content, are a promising fuel, when combusted with coal, for boilers of low and medium power in areas with low gasification. The use of local fuel resources, alternative fuels will reduce the consumption of natural fossil fuels, increase the environmental safety of enterprises in the fuel and energy complex, small-scale energy, and ensure a sustainable growth of the gross national product.

Key words: biofuel, ash content, release of volatiles, heat of combustion, co-incineration, flue gas cleaning.

For citation: Dremicheva ES., Zvereva ER, Burganova FI, Zverev LO. Prospects of the technology of joint combustion of biomass and coal at energy facilities. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):119-130. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130.

Введение

Целями Энергетической стратегии России до 2035 года является развитие технологического энергосбережения, переход от экспортно-сырьевого к ресурсно-инновационному развитию. При осуществлении энергетической политики особая роль отводится эффективному использованию местных видов топлива - торфа, древесины; отходов промышленных предприятий, агропромышленного комплекса [1–3]. Использование биотоплива в России и в мире является актуальной и перспективной задачей. Топливо биологического происхождения является альтернативой природному органическому топливу. Несомненными преимуществами биологического топлива является то, что имея соизмеримую с органическим топливом теплоту сгорания, оно может постоянно возобновляться [4].

Топливо биологического происхождения (твердое, жидкое или газообразное) образуется из различного сырья: растительного, животного сырья; отходов лесной промышленности (древесина) и сельского хозяйства (лузга, шелуха, солома, ботва, тростник); отходы жизнедеятельности животных и др.

Древесина и ее отходы являются одним из перспективных видов биотоплива. Площадь лесов России составляет около 8,09 млн. км² (первое место в мире), они покрывают 46,6% территории России. Доля лесопромышленного производства в промышленном комплексе России составляет порядка 4%. Около 1,4% вклада в ВВП России вносит лесной сектор экономики. Следовательно, можно сделать вывод о потенциале возможного использования отходов производства данных энергетических ресурсов для обеспечения генерации тепловой и электрической энергии.

Но прямое сжигание биомассы не всегда является эффективным, в связи с чем широкое распространение получили технологии производства твердого биотоплива. Большое количество отходов, образующихся в лесозаготовках, в процессе переработки древесины обладают ценным химическим составом, и являются сырьем для топливных гранул (пеллеты). Топливные пеллеты – экологически чистое топливо с содержанием золы не более 3%. Низшая теплота сгорания на сухую беззольную массу древесины и древесных гранул, произведенных из нее, имеет близкие значения. Гранулы менее подвержены самовоспламенению, что позволяет легко транспортировать их на большие расстояния. Топливные гранулы можно получить также из торфа и отходов сельского хозяйства [5-6].

В последние годы интерес к биологическому топливу существенно возрос, но, к сожалению, опыт работы промышленных котлов на биотопливе, рассчитанных на сжигание природного органического топлива оказался не совсем удачным. Перевод угольных, газовых и мазутных котлов на топливо биологического происхождения неизменно приводил к снижению паропроизводительности котлов, уменьшению КПД, к значительному увеличению выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, к загрязнению конвективных поверхностей нагрева котлов и др. В дальнейшем работы были направлены на адаптацию существующих котлов, и создание специализированных паровых и водогрейных котлов для сжигания альтернативного биологического топлива.

По мере развития технологии использования биотоплива использовались: вихревое сжигание; сжигание в кипящем, циркулирующем кипящем слое. Основными критериями выбора типа топочного устройства являются: размеры частиц; влажность; зольность температура горения, температура плавления золы биотоплива.

Существует положительный опыт эксплуатации котлов с вихревыми топками при использовании биотоплива. Благодаря аэродинамической схеме, в низкотемпературных вихревых топках происходит полное сжигание топлива, с одновременным уменьшением образования отложений, характерных для высокотемпературных топочных процессов [5].

Совместное сжигание природного ископаемого топлива и биомассы, представляется экономически и экологически целесообразным, так как снижаются выбросы углекислого газа, серы и оксидов азота, а также практически всегда можно перейти без дополнительных реконструкций и значительных инвестиций на моносжигание твердого топлива. Существует несколько способов совместного сжигания природного ископаемого топлива и биомассы. Это - прямое совместное сжигание, не прямое совместное сжигание и параллельное сжигание методом газификации биотоплива и подачи в котел генераторного газа. Газификация является перспективным способом сжигания торфа, в результате которого образуется генераторный горючий газ различного состава, служащий альтернативой природному газообразному топливу. Газификация, в отличие от прямого сжигания торфа, позволяет получить чистый газ с заданными определенными показателями качества. Генераторный горючий газ использоваться в котлах и в камерах сгорания газотурбинных установок. [5].

Материалы и методы

В статье рассмотрена возможность совместного использования каменного угля на примере каменного угля Кузнецкого угольного бассейна (ГОСТ 32356-2013) с торфом и биомассой: древесными опилками и подсолнечным жмыхом.

Торф – относят экологически чистым, местным видам органического топлива органический, экологически чистый материал, при его добыче, сжигании и хранении наносится минимальное технологическое воздействие на воздух, почву и воды. В России сосредоточено в среднем от 40 до 60% мировых запасов торфа. Основные торфяные залежи в Российской Федерации находятся и составляют: в Томской области порядка 30 % и порядка 12% в Вологодской области. Значительные залежи торфа находятся в Рязанской, Московской, Владимирской областях. Каждый год запасы торфа в России увеличиваются на 250 млн. тонн. Таким образом, в России есть хорошие перспективы в решении задач и проблем местной энергетики. В последние годы использование торфа для нужд энергетики значительно уменьшилось [1]. Уровень использования торфа не соответствует ни доступным для освоения топливным ресурсам, ни производственному потенциалу

торфяной отрасли. По энергетическому потенциалу торф в Российской Федерации превосходит суммарные запасы нефти и газа, и уступает только суммарным запасам угля [6]. Например, в Республике Татарстан сейчас официально разрабатывается лишь одно месторождение – «Лебяжье» для использования торфа в качестве удобрения, хотя в республике имеются до 30 000 га торфяных болот, из них 80% – 685 торфяных болот разведаны и исследованы. В настоящее время торф потерял свою актуальность как энергетическое топливо.

В энергетике применяются следующие виды торфяного топлива:

- фрезерный торф – это крошка, высушенного в полевых условиях топлива, и предназначенная для пылевидного сжигания;
- кусковой торф – оформленные и высушенные в полевых условиях крупные куски торфа;
- торфяные брикеты – фрезерный торф, куски которого спрессованы и высушены в искусственных условиях, и имеют установленную форму и размер;
- гранулированный торф – это переработанный, высушенный в искусственных условиях и спрессованный в гранулы [7-9].

Наряду с торфом в качестве местного сырьевого потенциала выступают отходы лесопромышленного комплекса и деревообработки – разновидность переработанной и измельченной древесины – древесные опилки. Опилки, являясь отходами деревообрабатывающей промышленности, нашли широкое применение для изготовления прессованных промышленных изделий; в строительстве, качестве мульчирующего материала; как субстрат для мицелий. Древесные опилки состоят из 27% лигнина, 70% целлюлозы, гемицеллюлозы. В Республике Татарстан имеется крупное предприятие по производству топливных, древесных пеллет – Сабинский лесхоз.

Жмых (шелуха от семечек) – получают путем отжима растительного масла на прессах различной конструкции из прошедших подготовку семян масличных культур (подсолнечника, рапса, рыжика, льна и др.), является концентрированным кормом для животных и прикормом для рыб с большим содержанием белка (15–40%), одним из компонентов комбикормов. Жмых состоит из воды (11%), протеина (40%), масла (6 — 9 %), клетчатки (5 %). В Республике Татарстан жмыхи из переработанных маслосемян получают на АО «Казанский маслоэкстракционный завод».

Жом (продукт переработки сахарной свеклы). Свекловичный жом является побочным продуктом производства свекловичного сахара, это обессахаренная свекловичная стружка с содержанием сухих веществ около 6,5-7,0%. Ежегодно в России на предприятиях агропромышленного комплекса, пищевых комбинатах образуются сотни миллионов тонн отходов сахарной свеклы. Частично, после соответствующей обработки жом используется на корм животным, в качестве минеральных удобрений, но подавляющая доля этих отходов накапливается, подвергается сжиганию или захоронению в свалках, что сопровождается значительными выбросами продуктов окисления в атмосферу, а также загрязнением почв и грунтовых вод, поэтому обезвреживание, утилизация продуктов переработки сахарной свеклы является важной и актуальной проблемой. Все эти отходы можно использовать для производства альтернативного топлива – биоэтанола или биогаза. Химический состав свежего свекловичного жома (в сухом веществе): целлюлоза (45-47 %), пектиновые вещества (50 %), белок (2 %), сахар (0,6-0,7 %) минеральные вещества (1 %), присутствуют витамины и органические кислоты. Основные производители жома сахарной свеклы в Татарстане – Буинский и Заинский сахарные заводы.

Биотопливо может стать достойным конкурентом природного ископаемого твердого твердого топлива, такого как уголь, антрацит, сланцы, и решает важную проблему утилизации отходов агропромышленного комплекса, пищевых производств [10-12].

Обсуждение результатов

Предложенная биомасса (торф, древесные опилки, подсолнечный жмых) по сравнению с природным ископаемым твердым топливом имеют меньшие значения низшей теплоты сгорания рабочей массы топлива, являющейся основной теплотехнической характеристикой любого вида топлива. В литературе, в различных источниках встречаются данных, которые значительно отличаются друг от друга, что вполне объяснимо, так как различные источники сырья, способы переработки и условия хранения. Поэтому была поставлена цель в рамках данной работы – провести экспериментальные исследования по определению теплоты сгорания топлива ($Q_{н}^p$) в лабораториях топлив и масел филиала АО «Татэнерго» «Казанская ТЭЦ-1» и филиала ОАО ТКГ-16 «Казанская ТЭЦ-3». В качестве объектов исследования были выбраны: каменный уголь Кузнецкого угольного бассейна; торф месторождения Сосновое Республики Татарстан; древесные опилки, полученные

после переработки лиственных пород деревьев; жмых из переработанных маслосемян на АО «Казанский маслоэкстракционный завод».

В соответствии с действующими ГОСТ были определены влажность (ГОСТ Р 52911-2013), зольность (ГОСТ Р 55661-2013), и выход летучих веществ (ГОСТ Р 55661-2013) образцов топлив. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические свойства топлива

Вид топлива	Низшая теплота сгорания рабочей массы топлива	Эквивалент к условному топливу	Влажность рабочей массы топлива	Зольность рабочей массы топлива	Выход летучих веществ рабочей массы топлива
	МДж/кг		%	%	%
Условное топливо	29.33	1.0	—	—	—
Каменный уголь	26.66	0.91	30.0	9.0	45.0
Торф	11.5	0.39	67.05	3.0	93.3
Древесные опилки	19.63	0.67	9.95	0.7	89.09
Подсолнечный жмых	18.4	0.62	8.2	1.0	8.5

Были проведены экспериментальные исследования с целью изучения влияния количества биомассы в твердотопливной композиции при их совместном сжигании на зольность и выход летучих продуктов. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1-2.

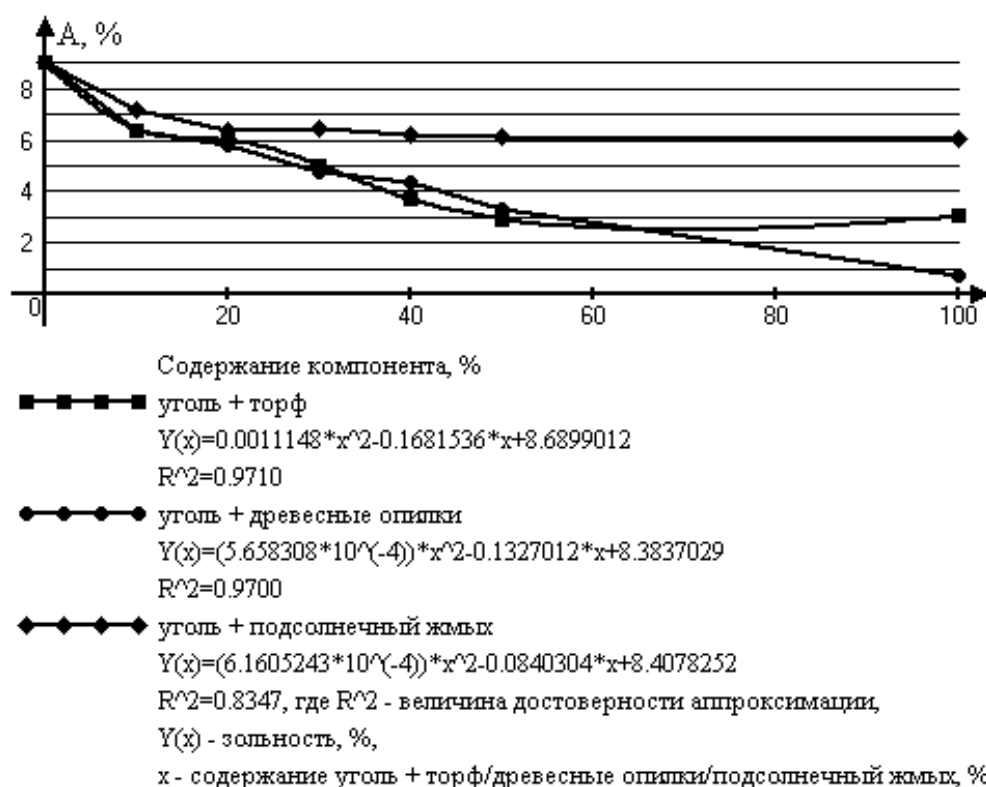


Рис. 1. Зольность при совместном сжигании каменного угля и биомассы при различной доле торфа и биомассы в общем балансе

Fig.1. Ash content in the co-combustion of coal and biomass with a different proportion of peat and biomass in the total balance

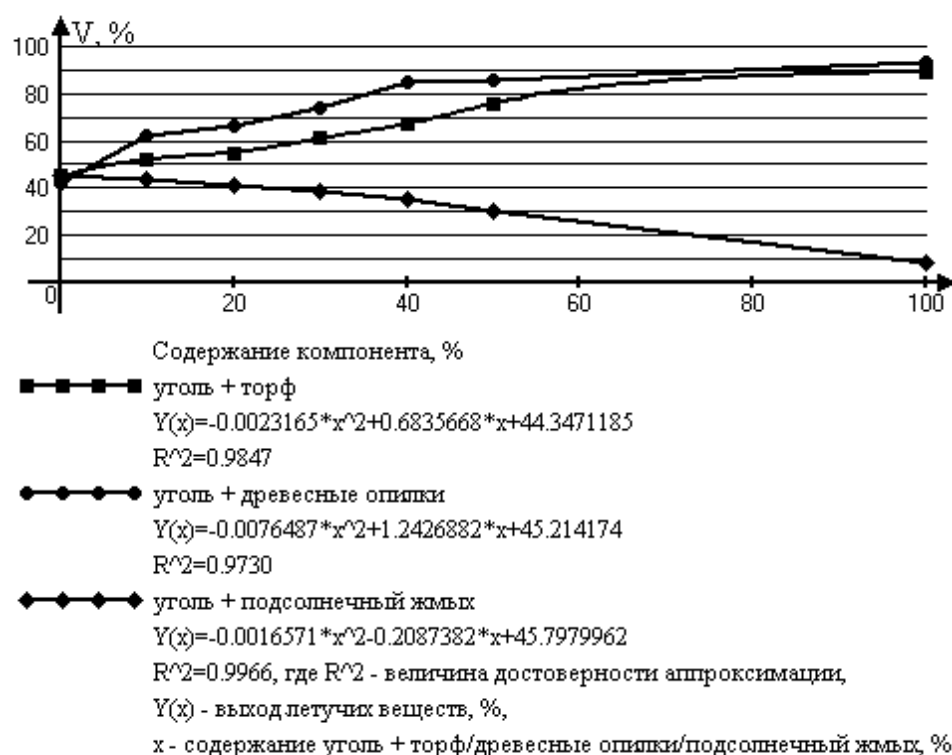


Рис. 2. Выход летучих веществ при совместном сжигании каменного угля и биомассы при различной доле торфа и биомассы в общем балансе

Fig.2. The yield of volatile substances in the co-combustion of coal and biomass with a different proportion of peat and biomass in the total balance

Из полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод, что добавление биомассы снижает зольность топлива на 22-70%; выход летучих продуктов будет увеличиваться в случае совместного использования угля с торфом и древесными опилками на 40-50%, при использовании жмыха, напротив, выход летучих веществ уменьшится на 20-22%, что вполне объяснимо при высоких значениях золы, образующейся при совместном сжигании угля с жомом.

При анализе полученных расчетных данных теплоты сгорания смеси топлив, пришли к выводу, что предельно допустимым значением содержание торфа, древесных опилок, жмыха в топливной смеси будет 20%, так как свыше данного значения теплота сгорания топливной смеси будет существенно снижаться, и следовательно это будет экономически невыгодно (рис. 3).

По полученным экспериментальным данным рассчитали экономию топлива при использовании топливной смеси. Для котельной производительностью 400000 Гкал/год расход каменного угля составит 62800 т/год при моносжигании, и 48960 т/год при совместном сжигании угля с торфом, древесными опилками или жмыхом.

В табл. 2 представлен расчет сжигания каменного угля с добавлением 20% торфа, древесных опилок, жмыха, в табл.3 представлен расчет необходимого количества топлива для котельной производительностью 400 000 Гкал/год при моносжигании топлив.

Таблица 2

Необходимое количество топлива для котельной производительностью 400 000 Гкал/год при совместном сжигании топлив

Показатель	Топливо			
	уголь	опилки	торф	жмых
Расход т/год	48960	16960	29120	18220
Цена, руб./т	6500	7000	6500	16000
Стоимость млн. руб./год	318.24	118.72	189.28	291.52

Таблица 3

Необходимое количество топлива для котельной производительностью 400 000 Гкал/год при
моносжигании топлив

Показатель	Топливо			
	Уголь	Опилки	Торф	Жмых
Расход т/год	62800	85300	145600	91100

Также была произведена оценка величины предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха, и расчет предотвращенного ущерба от загрязнения почв и земель от золоотвалов объектов теплоэнергетики. В табл.4 представлены расчетные значения количества продуктов сгорания топлива SO₂, CO, NO₂, твердых частиц летучей золы, образующихся при сжигании угля, торфа, древесных опилок и подсолнечного жмыха.

На рис. 3 показаны расчетные значения низшей теплоты сгорания при совместном сжигании каменного угля с торфом и биомассой.

Таблица 4

Расчетные значения количества продуктов сгорания топлива

Вид топлива	Количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, т/год			
	SO ₂	CO	NO ₂	твердые вещества
Каменный уголь	660	748	192	1.2
Древесные опилки	99.87	3397	149.81	0.06
Торф	83.7	1063	263	0.23
Подсолнечный жмых	328	3285	435	0.19

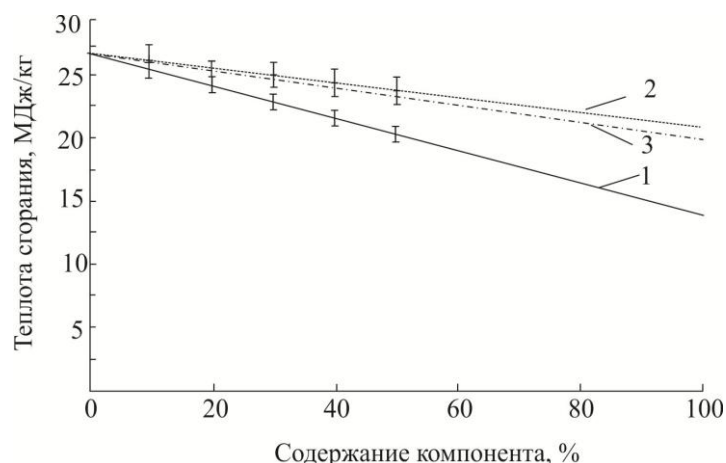


Рис. 3. Расчетные значения низшей теплоты сгорания при совместном сжигании каменного угля с торфом и биомассой: 1 – торф;

2 – древесные опилки; 3 – подсолнечный жмых

Fig.3. Calculated values of the lowest heat of combustion in the co-combustion of coal with peat and biomass: 1-peat; 2 – sawdust; 3-sunflower cake

Был проведен расчет на основе показателей удельного ущерба, представляющих собой удельные стоимостные оценки ущерба от выброса единицы (1 условной тонны) приведенной массы загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух, для оценки величины предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха стационарными и передвижными источниками выбросов по формуле (1), имеющей следующий вид:

$$Y_{\text{пр}}^a = Y_{\text{уд}} \sum MK_{\text{э}}, \quad (1)$$

где $Y_{\text{пр}}^a$ – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха выбросами от стационарных источников, тыс. руб.,

$M = \sum m_i K_{\Sigma i}$ – приведенная масса выбросов загрязняющих веществ в рассматриваемом регионе, усл.т., K_{Σ} – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий экономических районов России, m_i – масса выброса в атмосферной воздух i -го загрязняющего вещества, т/год; $K_{\Sigma i}$ – коэффициент относительной эколого-экономической опасности i -го загрязняющего вещества [13].

В табл. 4 приведены расчетные значения продуктов сгорания угля, торфа, древесных опилок и подсолнечного жмыха.

Однозначный вывод о преимуществе одного из трех топлива по данным табл. 4 сделать невозможно.

При сжигании угля образуется больше оксидов серы и твердых веществ, но существенно меньше количество углекислого газа. Количество окиси азота, образующейся при сжигании угля, больше, чем при сжигании древесных опилок, но меньше, чем при сжигании торфа и жмыха.

При сжигании торфа по сравнению с опилками и жмыхом образуется меньше оксидов серы и оксидов углерода, но больше оксидов азота.

При сжигании подсолнечного жмыха образуется большое количество оксидов азота и серы по сравнению с торфом и опилками, и соизмеримое количество оксида углерода при сжигании торфа. Поэтому подсолнечный жмых рекомендовать как альтернативу традиционному каменному углю нецелесообразно.

По приведенному расчету предотвращенного экологического ущерба, произведенному на альтернативной основе: уголь/опилки, уголь/торф и уголь/жмых, можно заключить, что по сравнению с углем и торф, и опилки равнозначны в отношении предотвращенного экологического ущерба.

Расчет предотвращенного ущерба от загрязнения почв и земель от золоотвалов объектов теплоэнергетики при сжигании каменного угля проводился по (2):

$$Y_{\text{пр}}^{\text{Д}} = H_{\text{с}} S K_{\Sigma} K_{\Pi}, \quad (2)$$

где $Y_{\text{пр}}^{\text{Д}}$ – предотвращенный в результате природоохранной деятельности экологический ущерб от деградации почв и земель, тыс. руб.,

$H_{\text{с}}$ – нормативная стоимость земель, тыс. руб./га;

S – площадь почв и земель, сохраненная от деградации, га;

K_{Σ} – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости территории;

K_{Π} – коэффициент для особо охраняемой территории.

При условии, что получаемая при сгорании биомассы зола, может быть использована как удобрения в сельском хозяйстве и приусадебных участках, предотвращенный экологический ущерб расчет от загрязнения почв и земель при функционировании золоотвалов, являющихся неотъемлемой частью твердотопливных котельных, работающих на каменном угле, составит 58,3 млн. руб./год в ценах 2018 г.

Была разработана схема совместного сжигания угля и биомассы (рис. 4) с последующей комплексной очисткой образующихся вредных газов озонно-аммиачным методом (рис. 5).

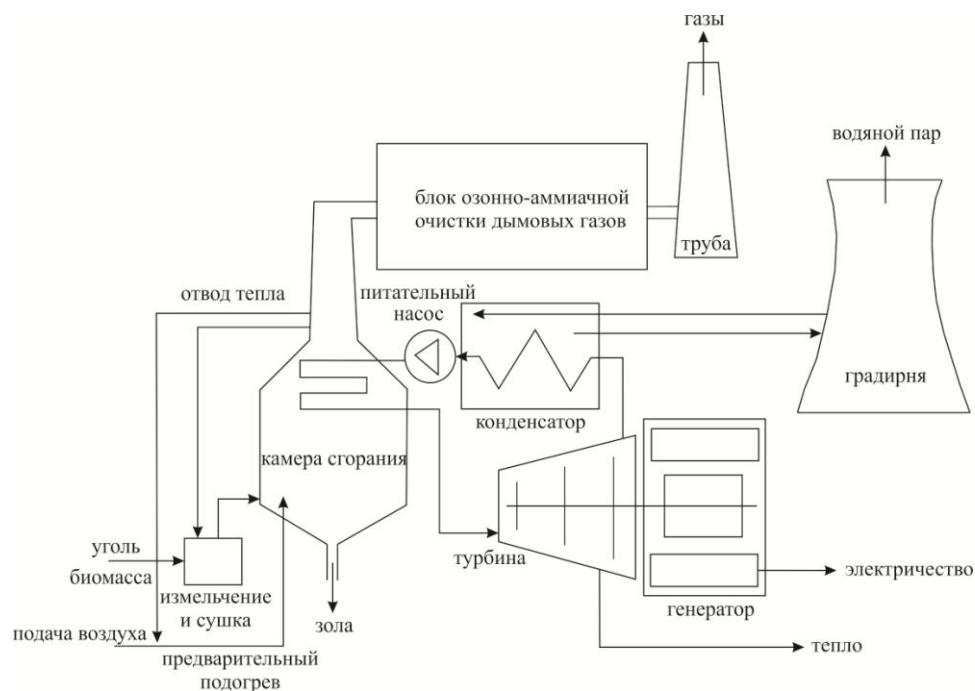


Рис. 4. Технологическая схема совместного сжигания угля с торфом и биомассой

Fig.4. Technological scheme of co-combustion of coal with peat and biomass

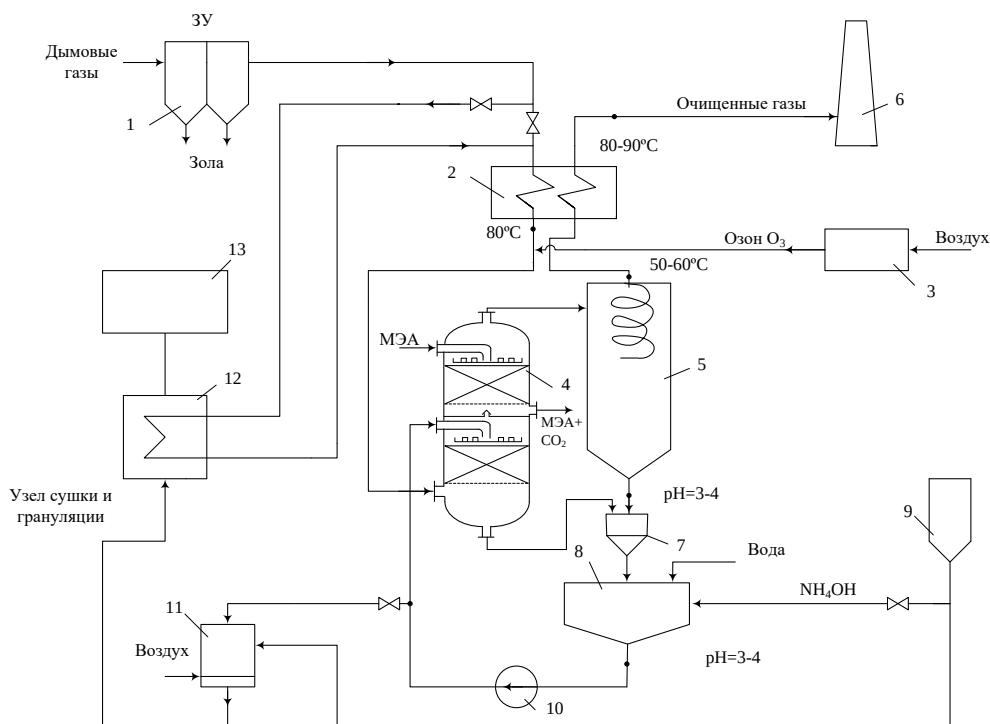


Рис. 5. Технологическая схема реализации озонно-аммиачного метода:

1–золоуловитель; 2–теплообменник; 3 – генератор озона; 4 – абсорбер; 5 – каплеуловитель; 6 – дымовая труба; 7 – гидрозатвор; 8 – циркуляционная емкость; 9 – бак; 10 – насос; 11 – реактор-окислитель; 12 – узел сушки и грануляции удобрений; 13 – склад готовой продукции

Fig.5. technological scheme of realization of the ozone-ammonia method:

1–ash collector; 2–heat exchanger; 3 – ozone generator; 4 – absorber; 5 – drip tray; 6 – chimney; 7 – water seal; 8 – ventilation capacity; 9 – tank; 10 – pump; 11 – reactor-oxidant; 12 – node drying and granulation of fertilizers; 13 – finished products warehouse

Дымовые газы, образующиеся при сжигании топлива, направляются на очистку в золоуловитель 1 и теплообменник 2, где происходит их охлаждение до температуры порядка 55 °С. Далее происходит окисление оксида серы SO_2 и оксида азота NO озонированным воздухом, производимым озонаторной станцией 3 до высших оксидов SO_3 ,

NO₂, N₂O₅. В абсорбере 4 происходит очистка от оксидов серы, оксидов углерода и диоксидов углерода. Абсорбер состоит из двух секций насадки и глухой тарелкой между ними. Дымовые газы поступают в абсорбер, проходят через секцию насадки, где происходит поглощение оксидов серы, оксидов азота технической водой. Через глухую тарелку дымовые газы проходят во вторую секцию аппарата, где происходит их очистка от диоксида углерода, путем поглощения раствором моноэтаноламина (МЭА).

Абсорбер работает в пленочном режиме. При малых скоростях газа отсутствует влияние газового потока на скорость стекания по насадке жидкой пленки и, следовательно, на количество задерживаемой в насадке жидкости. В каплеуловителе 5 направляются очищенные продукты сгорания, где происходит разделение потока, продукты сгорания подогреваются в теплообменнике до 80–90°C и выбрасываются в дымовую трубу 6 [13].

Заключение

Таким образом, и торф, и древесные опилки могут использоваться при совместном сжигании с традиционными твердыми топливами. Теплоты сгорания топлив соизмеримы между собой, но биологическое топливо доступнее природного ископаемого топлива в плане транспортирования от места добычи до потребителя. Относительно высокие теплота сгорания и малая зольность торфа и древесных опилок делают их перспективным топливом для нужд, в-первую очередь, малой энергетики. Не требуют значительной реконструкции и существенных инвестиций мероприятия по переводу котельных с угля на торф или древесные опилки. Следовательно, торф и древесные опилки можно рассматривать как альтернативный и доступный источник при совместном сжигании углей, способный уменьшить негативное экологическое воздействие на окружающую среду, отказаться от инвестиций в реконструкцию и строительство новых золошлакоотвалов [14–16].

Применение местных топливных ресурсов, альтернативных видов топлива позволит сократить расход природного ископаемого топлива, повысить экологическую безопасность предприятий топливно-энергетического комплекса, малой энергетики, обеспечить устойчивый рост валового национального продукта, сократить бюджетные расходы, и в конечном итоге, повысить энергобезопасность страны.

Литература

1. Панцхава Е.В., Шипилов М.М., Ковалев Н.Д. Биоэнергетика России: настоящее и будущее (биоэнергетика и политика) // Академия Энергетики. 2008. №3(23). С. 40-45.
2. Гревцев Н.В., Александров Б.М., Верхотуров И.М., и др. Технологические и геоэкологические аспекты использования торфа в энергетике // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2012. №1. С. 17-21.
3. De França Lopes G., de Matos Jorge L.M., Paraíso P.R., et al. Dimethyl ether production from sugarcane vinasse: modeling and simulation for a techno-economic assessment // Bioenergy research. 2020. V. 13. N2. pp. 397-410.
4. Назаров В.И., Макаренко Д.А., Мавлюдова Я.А. Комплексные теплофизические исследования топливных гранул на основе растительных и древесных отходов и техногенного сырья // Кокс и химия. 2018. № 6. С. 43-48.
5. Ali S., Shafique O., Mahmood S., et al. Biofuels production from weed biomass using nanocatalyst technology // Biomass and bioenergy. 2020. V. 139. p.105595.
6. Малыгин П.В., Любов В.К. Характеристики топливных гранул из различных видов древесных пород // Химия твердого топлива. 2015. №5. С. 61–69.
7. White P.M., Webber C.L., Viator R.P., et al. Sugarcane biomass, dry matter, and sucrose availability and variability when grown on a bioenergy feedstock production cycle // Bioenergy research. 2019. V. 12. №1. pp. 5–67.
8. Зверева Э.Р., Шаронова Е.В., Лаптев А.Г. Расчет процесса газификации угля в неподвижном и псевдооживленном слое // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2005. №5-6. С. 3-10.
9. Селеннов В.Г., Михайлов А.В. Торф в малой энергетике // Академия энергетики. 2009. №1(27). С. 48–56.
10. Тимофеева С.С., Мингалеева Г.Р. Перспективы использования торфа в региональной энергетике // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 325. № 4. С. 46–55.
11. Tolvanen H., Kokko L., Raiko R. Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a droptube reactor, particle geometry analysis, and kinetics modeling // Fuel. 2013. N.111. pp. 148–156.

12. Korjajkins A., Toropovs N., Kara P., et al. Application of Peat, Wood Processing and Agricultural Industry Byproducts in Producing the Insulating Building Materials // Journal of architecture and civil engineering. 2013. V. 2. N.1. pp. 62–68.

13. Зверева Э.Р., Фарахов Т.М., Исхаков А.Р. Снижение вредных выбросов тепловых электростанций // Вестник Казанского энергетического университета. 2011. № 1(8). С. 39–44.

14. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Исследование дисперсности и химического состава частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле БКЗ-210-140Ф // Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. №5-6. С. 55–64.

15. Дремичева Е.С., Гаврилов А.С., Маношин А.О. Оценка потенциала биотоплива для генерации тепловой энергии на объектах топливно-энергетического комплекса // Промышленная энергетика. 2017. №1. С. 55–60.

16. Дремичева Е.С. Энергетические свойства торфа, насыщенного нефтепродуктами // Надежность и безопасность энергетики. 2020. Т. 13. №2. С. 105–109.

Авторы публикации

Дремичева Елена Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии в энергетике и нефтегазопереработке» (ТЭН), Казанский государственный университет.

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Технологии в энергетике и нефтегазопереработке» (ТЭН), Казанский государственный университет.

Бурганова Фирюза Ильсуровна – соискатель кафедры «Технологии в энергетике и нефтегазопереработке» (ТЭН), Казанский государственный университет.

Зверев Леонид Олегович – студент Высшей школы технологий и энергетики СПбГУПТД, г. Санкт-Петербург.

References

1. Pantskhava EV, Shipilov MM, Kovalev ND. Bioenergetika Rossii: nastoyashchee i budushchee (bioenergetika i politika). *Akademiya Energetiki*. 2008;23(3):40-45.

2. Grevtsev NV, Aleksandrov BM, Verkhoturov IM, et al. Tekhnologicheskie i geoeologicheskie aspekty ispol'zovaniya torfa v energetike. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2012;1:17-21.

3. De França Lopes G, de Matos Jorge LM, Paraíso PR, et al. Dimethyl ether production from sugarcane vinasse: modeling and simulation for a techno-economic assessment. *Bioenergy research*. 2020;13(2):397-410.

4. Nazarov VI, Makarenkov DA, Mavlyudova YA. Fuel Granules Based on Organic and Industrial Waste. *Coke and Chemistry*. 2018;61(6):230-233.

5. Ali S, Shafique O, Mahmood S, et al. Biofuels production from weed biomass using nanocatalyst technology. *Biomass and bioenergy*. 2020;139:105595.

6. Malygin PV, Lyubov VK. Characteristics of fuel granules from different wood species. *Solid Fuel Chemistry*. 2015; 49(5):326-334.

7. White PM, Webber CL, Viator RP, et al. Sugarcane biomass, dry matter, and sucrose availability and variability when grown on a bioenergy feedstock production cycle. *Bioenergy research*. 2019;12(1):5-67.

8. Zvereva ER, Sharonova EV, Laptev AG. Calculation of process of gasification of coal in motionless and pseudo fluid the layer. *Proceedings of higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2005;5-6:3-10.

9. Selenov VG, Mikhailov AV. Torf v maloi energetike. *Akademiya energetiki*. 2009; 27(1):48-56.

10. Timofeeva SS, Mingaleeva GR. Perspektivy ispol'zovaniya torfa v regional'noi energetike. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii v energetike*. 2014;325(4):46-55.

11. Tolvanen H, Kokko L, Raiko R. Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a droptube reactor, particle geometry analysis, and kinetics modeling. *Fuel*. 2013; 111:148-156.

12. Korjamins A, Toropovs N, Kara P, et al. Application of Peat, Wood Processing and Agricultural Industry Byproducts in Producing the Insulating Building Materials. *Journal of architecture and civil engineering*. 2013;2(1):62-68.
13. Zvereva ER, Farakhov TM, Iskhakov AR. Snizhenie vrednykh vybrosov teplovykh elektrostantsii. *Vestnik Kazanskogo energeticheskogo universiteta*. 2011;8(1):39-44.
14. Kuzmin VA, Zagray IA, Desyatkov IA. Research of dispersity and chemical composition of particles in the combustion products at gas-peat mixture burning in the steam boiler BKZ-210-140F. *Proceedings of higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2016;5-6:55-64.
15. Dremicheva ES, Gavrilov AS, Manoshin AO. Otsenka potentsiala biotopliva dlya generatsii teplovoi energii na ob"ektakh toplivno-energeticheskogo kompleksa. *Promyshlennaya energetika*. 2017;1:55-60.
16. Dremicheva ES. Energeticheskie svoistva torfa, nasyshchennogo nefteproduktami. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2020;13(2):105-109.

Author of the publication

Elena S. Dremicheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Firyuza I. Burganova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Leonid O. Zverev – Graduate School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design, St. Petersburg, Russia.

Получено

09 февраля 2021г.

Отредактировано

05 марта 2021г.

Принято

05 марта 2021г.



АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДИК ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ

К.М. Мирсалихов, А.М. Грибков, Н.Д. Чичирова

Казанский государственный энергетический университет»,

г. Казань, Россия

mirsalikhovkm@gmail.com, gribkovalmi@mail.ru, ndchichirova@mail.ru

Резюме: наиболее значимые технические решения должны оптимизироваться с помощью технико-экономического анализа, что позволяет уменьшить затраты на их реализацию. В связи с тем, что от скорости газов в стволе дымовой трубы зависит ее диаметр и высота, этот параметр является определяющим при проведении технико-экономического анализа. Однако существующие в Российской Федерации методики и нормативные документы, касающиеся строительства и проектирования дымовых труб учитывают не все необходимые характеристики и параметры, например, экономическую составляющую определения оптимальной скорости газов. **ЦЕЛЬ.** Обзор зарубежных источников, в которых рассматриваются указанные вопросы и проблемы. **МЕТОДИКА.** Для обзора были выбраны нормативные документы и научные работы, опубликованные в технически наиболее развитых странах. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе анализа методологии моделирования рассеивания примесей и расчета высоты дымовой трубы были сделаны выводы о том, что, несмотря на большое количество расчетных моделей, наиболее точными являются модели рассеяния вредных примесей в воздухе, основанные на метеорологических данных, характерных для конкретного региона. Однако ни одна из рассмотренных методик выбора основных размеров дымовой трубы не основана на определении оптимальной скорости выхода газов, исходя из технико-экономического анализа. Выбор скорости газов носит рекомендательный характер и в основном связан с условиями формирования начального участка дымового факела и не зависит от стоимости трубы. Разрабатываемая в России методика позволяет учесть более широкий спектр условий работы дымовой трубы, в т.ч. и для переходного этапа к «Зеленой энергетике», когда состав продуктов сгорания будет меняться в зависимости от доли водорода в котельном топливе.

Ключевые слова: дымовые трубы; тепловые электрические станции; рассеивание вредных выбросов, оптимальная скорость газов; высота дымовой трубы; нормативные методики; экология и энергетика; промышленные объекты.

Для цитирования: Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб // ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 131-145. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145.

ANALYSIS OF METHODS FOR SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF STACK

KM. Mirsalikhov, AM. Gribkov, ND. Chichirova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

mirsalikhovkm@gmail.com, gribkovalmi@mail.ru, ndchichirova@mail.ru

Abstract: the most significant technical solutions should be optimized using a technical and economic analysis, which reduces the cost of their implementation. Due to the fact that the diameter and height of the chimney depends on the gas velocity in the chimney, this parameter is decisive when carrying out a feasibility study. However, the existing methods and regulations in the Russian Federation concerning the construction and design of chimneys do not take into account all the necessary characteristics and parameters, for example, the economic component of determining the optimal gas velocity. **PURPOSE** of this article is to review foreign sources, in which consider similar issues and problems to take into account foreign experience in the development of a new methodology. **METHODOLOGY.** For the review, regulatory documents and

scientific papers published in the most technically advanced countries were selected. **RESULTS.** In the course of analyzing the methodology for modeling the dispersion of impurities and calculating the height of the stack, it was concluded that, despite the large number of calculation models, the most accurate models are dispersion in air, based on meteorological data specific to a particular region. However, none of the considered methods for choosing the main dimensions of the stack is based on determining the optimal gas outlet rate based on the technical and economic analysis. The choice of the gas outlet rate is of a recommendatory nature and is mainly associated with the conditions for the formation of the initial section of the smoke plume and is not associated with the cost of the stack. The technique being developed in Russia makes it possible to take into account a wider range of chimney operating conditions, incl. and for the transitional phase to Green Energy, when the composition of combustion products will change depending on the proportion of hydrogen in the boiler fuel.

Keywords: stack; thermal power plants; dispersion of harmful emissions; optimal gas velocity; stack height; regulatory procedures; ecology and energy; industrial facilities.

For citation: Mirsalikhov KM, Gribkov AM, Chichirova ND. Analysis of methods for selection of optimal parameters of stack. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):131-145. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145.

Введение

Дымовые трубы - самые дорогостоящие элементы вспомогательного оборудования тепловых электрических станций, стоимость которых может превышать 500 млн. руб. К проектированию и строительству подобных сооружений должны предъявляться повышенные требования, так как ошибки и неточности могут привести к серьезному финансовому и экологическому ущербу. Очевидно, что одним из таких требований должна стать единая, утвержденная законодательством, методика определения оптимальных параметров дымовых труб. Попыткой сделать нечто подобное стал утвержденный приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 14 декабря 2017 г. № 1667/пр [1] и введенный в действие с 15 июня 2018 г. свод правил «Трубы дымовые промышленные. Правила проектирования» [2]. Но в данном своде отсутствует методика расчета оптимальных значений скорости выхода газов и высоты дымовой трубы, а даны лишь общие рекомендации по их выбору, которые не гарантируют от существенных ошибок при проектировании дымовых труб. Кроме того, в данном своде нет рекомендаций для многоствольных дымовых труб. Таким образом в утвержденном своде для проектирования дымовых труб отсутствуют методики определения ряда параметров, а выбор диаметра устья и высоты дымовой трубы проектные организации проводят на основании методик технико-экономических расчетов, не утвержденных в качестве обязательных стандартов. К тому же эти методики иногда опираются на планово-распределительную модель экономического развития страны. В связи с этим представляет интерес как такие вопросы решаются за рубежом.

Материалы и методы

Рассмотренные материалы обработаны методами научного исследования, такими как анализ (исследование отдельных вариантов), сравнения (нахождение общих и различных моментов в вариантах), синтеза (выработка новой концепции). Для анализа целесообразно обратиться к странам лидерам в энергетическом машиностроении, в выработке электроэнергии и с развитым экологическим и энергетическим законодательством.

Все западные страны проектируют дымовые трубы согласно разработанных международным комитетом промышленных сооружений (*International Committee on Industrial Construction (CICIND)*) кодам, то есть методики расчета параметров труб остаются различными в каждой стране, но конструкция труб приводится в соответствии с кодами *CICIND* [3].

В Великобритании после выхода из Евросоюза касательно дымовых труб на данный момент действует несколько нормативных документов:

1. Акт об окружающей среде, 1995 г. (*Environment Act*, 1995). [4]
2. Акт о защите окружающей среды 1990 г. (*Environmental Protection Act*, 1990) [5]
3. Третье издание акта чистого воздуха 1956 года меморандум по высотам дымовых труб (*The Third Edition of the 1956 Clean Air Act Memorandum on Chimney Heights (Department of the Environment*, (1981) [6]
4. Акт чистого воздуха 1993 (*The Clean Air Act* 1993) [7]

Все эти нормативные документы связаны между собой, но особое внимание необходимо уделить Environmental Protection Act 1990, так как в нем в главе «Руководство по высоте рассеивающей трубы для загрязняющих выбросов» (Guidelines on Discharge Stack Heights for Polluting Emissions) достаточно подробно изложена методика определения оптимальных параметров дымовых труб.

По этой методике высота дымовой трубы рассчитывается с использованием индекса загрязнения (*Pollution Index*), P_i , и информации о выбросах в данном районе и ближайших источниках выбросов. Расчет состоит из трех этапов. Рассчитываются две высоты дымовой трубы в первом приближении, U_b и U_m , с учетом тепловой и динамической составляющей подъема дымового факела, соответственно. Затем рассчитывается окончательная высота трубы с поправкой на выброс из близлежащих источников.

Нескорректированная высота дымовой трубы U_b , м, рассчитывается с использованием индекса загрязнения P_i и плавучести выбросов. В подавляющем большинстве случаев, когда выбрасываемые газы являются продуктами сгорания или, в основном, представляют собой воздух, содержащий небольшую долю загрязняющих веществ, плавучесть обеспечивается непосредственно за счет тепла, содержащегося в выбрасываемых дымовых газах Q (МВт) на выходе из трубы.

Нескорректированная высота дымовой трубы U_m рассчитывается с использованием индекса загрязнения P_i и динамической составляющей выбрасываемых газов M . Подробно методика изложена в таблице 1.

По поводу выбора скорости выхода дымовых газов говорится только, что для предотвращения аэродинамического смыва вниз выбрасываемого шлейфа и его стекания за пределы устья вниз вдоль трубы рекомендуются их следующие минимальные значения:

- при тепловой мощности выброса Q :
 - менее 0,1 МВт - 10 м/с.
 - более 1 МВт - 15 м/с.
 - от 0,1 МВт до 1 МВт, пропорционально.
- При динамической составляющей M :
 - менее $10 \text{ м}^4/\text{с}^2$ - 10 м/с.;
 - более $100 \text{ м}^4/\text{с}^2$ - 15 м/с.;
 - от 10 до $100 \text{ м}^4/\text{с}^2$ – пропорционально.

Приведенный пример рекомендаций по поводу выбора скорости выхода является одним из самых подробных в рассмотренных источниках, но и в нем нет технико-экономических обоснований выбора скорости выхода газов.

В США в настоящее время действует разработанное в 1985 Агентством по защите окружающей среды (*Environment Protection Agency*) «Руководство по определению высоты дымовой трубы согласно надлежащей инженерной практике» (*Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document For the Stack Height Regulations)*) [8] как документ технической поддержки для руководства по определению высоты дымовой трубы. Высота дымовой трубы по [8] больше или равна высоте, на которой выброс струи из дымовой трубы не зависит от нисходящих потоков. Срыв потока вниз, в свою очередь, относится к застойному циркулирующему вихрю воздуха, который образуется с подветренной стороны источника выброса.

Высота дымовой трубы по [8] зависит от многих переменных:

- форма и размер соседних зданий;
- окружающая местность;
- ближайшие здания и сооружения;
- характеристики местного климата.

Согласно правилам Агентства по защите окружающей среды (EPA), высота дымовой трубы по [8] определяется как самая высокая из следующих:

- Не менее 65 метров при измерении от отметки уровня земли у основания дымовой трубы.
- $2,5H$ (для труб, построенных до 12 января 1979 г.), или $H + 1,5 L$ (для всех других дымовых труб), где H - высота самого здания или любой значимой соседней конструкции или сооружений, а L - меньшее из проектируемых высоты или ширины рассматриваемого здания.

– Высота, определенная с учетом атмосферной турбулентности в пределах пограничного слоя и вихревых эффектов, создаваемых застройкой. Расчет подробно изложен в [9].

Первый критерий просто устанавливает минимальную высоту дымовой трубы, в то время как второй является очень общим методом, который, однако, не может охватить все ситуации. Индивидуальный подход в этом случае может дать более точные результаты.

Исследование атмосферного пограничного слоя в аэродинамической трубе предлагаемого или существующего здания является общепринятым методом, который можно использовать для обоснования оптимальной высоты трубы, которая может сильно отличаться от часто цитируемого значения высоты здания, увеличенной в 2,5 раза. Это подтверждается в статье [10] где в ходе воздушного мониторинга было обнаружено что в городе Ринландер (США), имело место превышение часового стандарта концентрации оксидов серы SO_2 . Анализ источников выбросов и моделирование качества воздуха показало, что дымовая труба котельной *Expera Rhineland Mill* высотой 63 м, вносит основной вклад в воздействие на окружающий воздух. Для устранения превышения допустимых значений одним из решений являлось увеличить высоту дымовой трубы до высоты по [8]. Исходя из габаритов здания котла, высота дымовой трубы по [8] составила 75 м. После исследования геометрии здания *Expera Rhineland Mill* было замечено, что угол здания котельного агрегата №7 находится прямо с наветренной стороны от дымовой трубы. Когда ветер дует вдоль угла здания, образуются вихри в углах здания, которые усиливают снос дымового факела вниз в два раза по сравнению с тем, что наблюдается для направлений ветра, нормальных к фасаду здания. Эксперименты, проведенные в аэродинамической трубе, показали, что необходимая высота трубы по [8] может достигать 95 м для ситуации углового вихря. Таким образом фактическая высота дымовой трубы по [8], полученная с использованием моделирования в аэродинамической трубе, была принята 90 м, что значительно превышает высоту 75 м по формуле [8]. Наиболее подробно исследования по определению высоты GER представлены в [11-21].

То есть методика [8] в самом простом случае рекомендует высоту не ниже 65 метров или $H + 1,5 L$, во всех других случаях необходимы исследования в аэродинамической трубе. Касательно скорости выхода газов указано лишь, что она должна быть такой, чтобы не допустить срывания дымового факела вниз.

Несмотря на то, что в финальной версии методики [8] отсутствует связь между высотой дымовой трубы и скоростью выхода газов из устья, в США, в проведенном ранее исследовании [22], отмечалось что при проектировании крупных котельных установок очевидна тенденция к использованию большей скорости на выходе из устья трубы. В некоторых случаях, таких как законодательное ограничение высоты дымовой трубы для контроля защиты дыхательных органов людей, может не быть альтернативы использованию более высоких скоростей на выходе для получения необходимого рассеивания дымового шлейфа. В других случаях существующие конструкции могут быть неспособны выдерживать ветровую нагрузку, создаваемую на более высокие трубы. Для больших электростанций, где для рассеивания шлейфа предусмотрены дымовые трубы, превышающие высоту здания электростанции более чем в 2,5 раза, преимущество и эффективность относительно высоких скоростей истечения считаются сомнительными. В качестве проверки более высоких выходных скоростей для увеличения эффективной высоты дымовой трубы в устье дымовой трубы от котла блока мощностью 150 МВт было установлено сопло, увеличивающее скорость с 13,7 до 27,4 м/с. Наблюдения и сравнение с соседними агрегатами без сопел не выявили заметного увеличения подъема шлейфа во время инверсии или в условиях высокой скорости ветра. Хотя некоторая выгода была обнаружена при ветрах средней скорости, 2,2 – 3,6 м/с. Точность расчета по этой метеорологической модели, как правило, выше, чем по другим.

На начальном участке траектории преобладающее значение имеет динамическая составляющая подъема дымового факела, с удалением от трубы начинает преобладать тепловая составляющая. Скорость от 15 до 18 м/с была традиционно принята как достаточная для предотвращения значительного срыва вниз с подветренной стороны дымовой трубы. Более высокие скорости от 27-37 м/с, увеличивают размер и стоимость тягодутьевой машины, двигателя и затраты на обслуживание дымовой трубы, а также могут препятствовать поднятию дымового шлейфа из-за плавучести.

Как следует из Статьи 5 Директивы ЕС по сжиганию топлива [23] цитируется: «Установки для сжигания топлива или совместного сжигания различных видов топлива должны быть спроектированы, оборудованы, построены и эксплуатироваться таким образом, чтобы предотвращать выбросы, вызывающие значительное загрязнение воздуха на уровне земли, в частности, дымовые газы сбрасываются контролируемым образом и в соответствии с соответствующими стандартами качества воздуха». Однако не существует общеевропейской методологии моделирования качества воздуха и расчета высоты дымовой

трубы. Для этой цели используются национальные стандарты и рекомендации. В настоящее время существует большое количество расчетных моделей, которые различаются в каждой стране ЕС. Наиболее точными являются модели рассеяния в воздухе, основанные на краткосрочных метеорологических данных, всегда представляемых в виде компьютерных программ. Эти модели обычно закупаются крупными компаниями или используются консалтинговыми компаниями для работы на конкретных заводах и ТЭС, и, как правило, они используются для больших котельных агрегатов или иных установок со значительными выбросами в атмосферу.

Методика определения высоты дымовых труб, используемая в Испании изложена в постановлении Министерства окружающей среды от 18 октября 1976 г. «О предотвращении и устранении промышленного загрязнения атмосферы» [24]. Как указано в этом документе: «настоящее распоряжение устанавливает инструкции по расчету высоты дымовой трубы для достижения наиболее адекватного рассеивания загрязняющих веществ с целью обеспечения требуемого качества воздуха. Методика включена в Приложение II к настоящему Приказу и применима в целом для установок с общей выходной мощностью менее 100 МВт (тепловых), а также для дымовых труб, выбрасывающих максимум 720 кг/ч любого газа или 100 кг/ч твердых частиц. В дополнение к этому, формулы применимы, если дым имеет минимальный импульс за счет разницы температур дымовых газов в трубе и окружающей среды, то есть соответствует уравнению представленному в таблице 1.

В Швеции требования для расчета высоты дымовой трубы в качестве руководящих принципов установлены Шведским агентством по охране окружающей среды (*SEPA*), особенно для тепловых установок небольшого размера и мощности. Эти рекомендации были созданы в 1970 году и сначала включали только выбросы диоксида серы от сжигания нефти. Спустя годы это руководство было обновлено на основе отчетов, которые Шведский метеорологический и гидрологический институт (*SHMI*) разработал для *SEPA* [25]. Эти новые правила включали расчет высоты дымовой трубы с учетом также выбросов оксидов азота. Эта методика не применима для использования в сложных ситуациях, где рекомендуется дальнейшее конкретное исследование, например:

- ТЭС, расположенные на особо пересеченной местности;
- ТЭС со значительными выбросами из нескольких труб;
- для труб высотой более 60 м;
- ТЭС, расположенные в городских районах, где концентрация NO_2 у земли близка к превышению.

В Германии действуют правила контроля загрязнения воздуха «Технические инструкции по контролю качества воздуха» и обычно называемые *TA LUFT* [26]. Они содержат требования к крупномасштабным установкам и включают график для оценки высоты дымовых труб. В этом документе указывается, что: «Отработанные газы должны сбрасываться таким образом, чтобы было возможно их беспрепятственное рассеивание свободным потоком воздуха. Как правило, требуется выброс через дымовые трубы, высота которых должна определяться в соответствии с пунктами 5.5.2–5.5.4. В этих разделах документа указано, что «дымовые трубы должны иметь высоту не менее 10 м над уровнем земли». На сегодняшний день для расчета используют компьютерную программу *BESMIN* разработанную согласно правилам и на основе номограммы *TA LUFT*.

BESMIN - vorläufige und unverbindliche Testversion 0.14

Berechnung der Schornsteinbauhöhe nach Nr. 5.5 TA Luft 2016 (Entwurf)

Rauigkeitslänge z_0 0.5 m

Substanz Stickstoffoxide S 0.1 mg/m³

Quellstärke eq 8.528 kg/h

Schornsteindurchmesser dq 1.1 m

Austrittstemperatur tq 67 °C

Ausströmgeschwindigkeit vq 14.5 m/s

Relative Feuchte rq 0 %

Flüssigwassergehalt lq 0 kg/kg

Bauhöhe berechnen

Berechnete Bauhöhe hb 11.9 m

Bereits durchgeführte Berechnungen

z_0	S	eq	dq	tq	vq	rq	lq	hb	Substanz
0.50	1.00e-01	8.53e+00	1.1	67	14.5	0.0	0.000	11.9	Stickstoff

Zwischenergebnisse

$k1$	ua	$heff$	dev	hb
1.0	1.0	29.8	1.6%	10.0
1.0	1.5	27.8	1.4%	10.0
1.0	2.0	26.1	1.1%	10.0
2.0	1.0	41.8	0.8%	10.0
2.0	1.5	35.3	0.9%	10.0
2.0	2.0	30.9	0.7%	10.0
2.0	3.0	25.1	0.8%	10.0
3.1	1.0	40.6	1.0%	10.0
3.1	1.5	31.0	0.8%	10.0
3.1	2.0	26.3	0.7%	10.0
3.1	3.0	21.4	0.8%	10.0
3.1	4.5	17.9	0.6%	11.8
3.1	6.0	15.9	0.6%	11.9 *
3.1	7.5	14.5	0.6%	11.6
3.1	9.0	13.6	0.6%	11.3
3.1	12.0	12.2	0.5%	10.6
3.2	1.0	36.2	0.8%	10.0
3.2	1.5	29.6	0.9%	10.0
3.2	2.0	25.5	0.7%	10.0
3.2	3.0	21.1	0.7%	10.0
3.2	4.5	17.6	0.7%	11.8
3.2	6.0	15.6	0.6%	11.7
3.2	7.5	14.2	0.5%	11.4
3.2	9.0	13.3	0.5%	11.1
3.2	12.0	11.8	0.5%	10.4

Rechnergebnisse speichern

Рис. 1. Компьютерная программа BESMIN

Fig. 1. BESMIN computer program

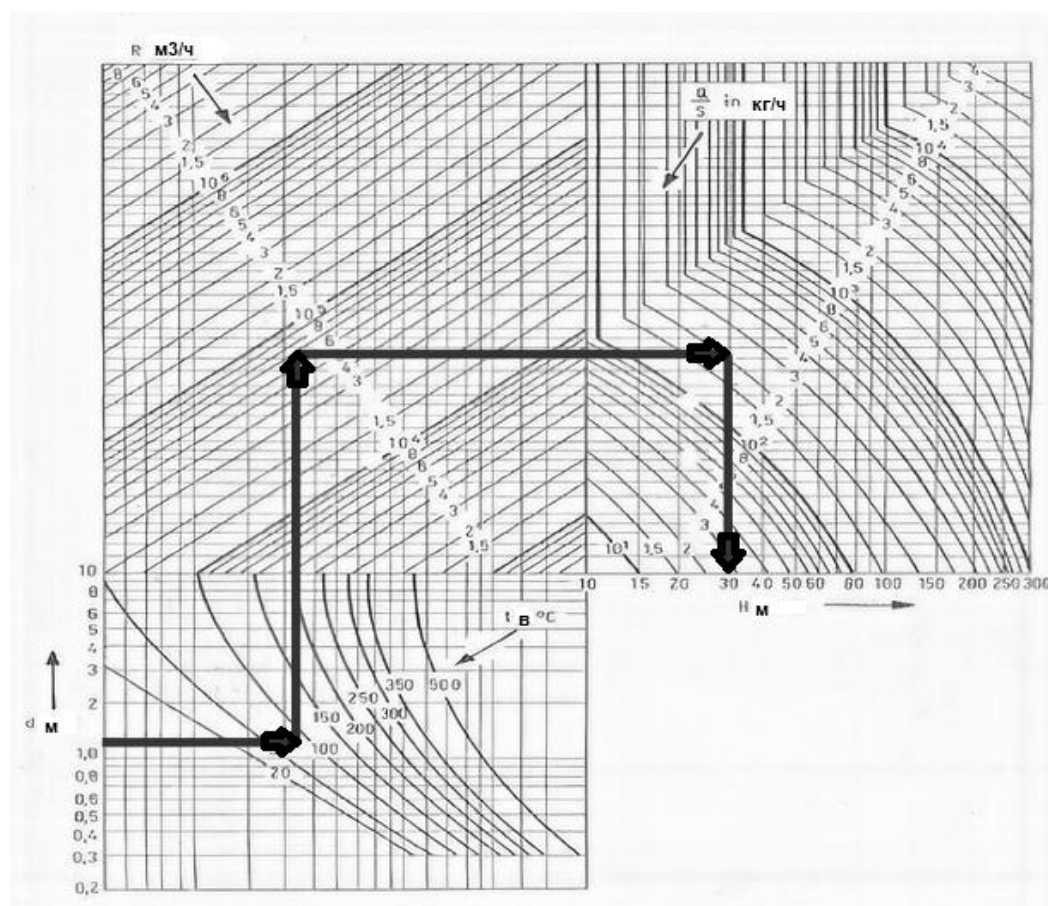


Рис. 2. Номограмма TA LUFT для определения высоты дымовой трубы

Fig. 2. TA LUFT nomogram for determining the height of the chimney

R - сухой объемный расход уходящих газов, м³/ч;

H - высота дымовой трубы по номограмме, м;

d - внутренний диаметр дымовой трубы, м;

T - температура отходящего газа на выходе из дымовой трубы, °C;

Q - массовый расход выбрасываемого загрязнителя в атмосферу, кг/ч;

S - коэффициент определения высоты трубы.

Вместо номограммы можно использовать компьютерную программу BESMIN.

Центральный совет по контролю за загрязнением (CPCB), национальное агентство правительства Индии, реализующее закон об окружающей среде, предложило «формулу минимальной высоты дымовой трубы», основанную на уравнении Гаусса, в качестве ориентира для оценки высоты дымовой трубы (CPCB) [27], далее были уточнения в [28] и [29]. Формула, разработанная CPCB в 1984 году, считалась применимой для всего Индийского полуострова. Считалось, что метеорологические данные двух городов Мумбаи и Калькутта представляют прибрежную метеорологию, а метеорологические данные Дели использовались для представления внутренней метеорологии. Высота смешения была определена на основе данных радиозонда, собранных Метеорологическим департаментом Индии (IMD). Температура дымовых газов принималась такой же, как и температура окружающего воздуха. Предложенная формула считалась действительной для всех мощностей ТЭС, т.е. влияние скорости на выходе и подъема факела не учитывалось. Было получено уравнение с учетом метеорологии трех городов:

$$H = a \cdot Q \cdot b.$$

Чтобы получить общую формулу для всей страны, коэффициент a и показатель степени b , полученные для всех трех городов, были арифметически усреднены. Окончательная полученная формула представлена в Таблице 1

Поскольку в дополнение к подробным метеорологическим данным с меньшими предположениями в настоящее время доступны более сложные и лучшие модели качества воздуха, которые облегчают более строгий учет условий рассеивания, в статье [30] была предпринята попытка разработки новой формулы для оценки минимальной высоты дымовой трубы. На рисунке 5 показано изменение требуемой высоты дымовой трубы в зависимости от интенсивности выбросов SO_2 для разных мест для двух случаев ТЭС мощностью 110 МВт и 500 МВт. Точки на кривой — это высота дымовой трубы, полученная в результате моделирования. Сплошной линией представлена кривая, полученная с помощью регрессионного анализа. Регрессионный анализ проводится для определения уравнения, которое лучше всего соответствует точкам данных. Кривая, которая дает коэффициент регрессии R^2 более 0,9, принимается. В таблице 1 представлено уравнение для высоты дымовой трубы, коэффициента регрессии и диапазона интенсивности выбросов SO_2 , в пределах которого уравнение действительно для ТЭС 110 МВт и 500 МВт соответственно.

Графики получены при различных метеорологических условиях. Характер кривой высоты дымовой трубы показывает изменение разбавляющего потенциала атмосферы с высотой, усредненной за 24-часовой период. Сравнивая кривые для 110 МВт и 500 МВт для каждого из выбранных городов, делаются два наблюдения. Кривые 110 МВт и 500 МВт показывают аналогичную тенденцию.

Это указывает на то, что изменение скорости газа на выходе, диаметра верхней части трубы, температуры газа на выходе не вызывает каких-либо изменений в тенденции кривой, вместо этого именно метеорология определяет тенденцию кривой высоты трубы и, следовательно, потенциал вертикального разбавления в атмосфере. Во-вторых, при той же интенсивности выбросов высота дымовой трубы, необходимая для 110 МВт, больше, чем для 500 МВт. Это объясняется более высоким подъемом дымового газа, выбрасываемого из дымовой трубы мощностью 500 МВт из-за более высокой скорости на выходе, диаметра верхней части дымовой трубы и температуры дымового газа по сравнению с 110 МВт. Сравнивая уравнение для двух сезонов, лета и зимы, было обнаружено, что дополнительная высота дымовой трубы для увеличения нагрузки выбросов SO_2 остается постоянной (прямолинейная зависимость) для летнего сезона, в то время как она уменьшается для зимнего сезона. Чтобы получить допустимую приземную концентрацию $80 \text{ мкг/м}^3 \text{ SO}_2$ (в России 500 мкг/м^3) высота дымовой трубы, определяемая по зимним условиям, оказывается меньше, чем в летний период.

В Китае действует нормативный документ, разработанный министерством экологии и окружающей среды Китайской Народной Республики (*Ministry of ecology and environment the people's Republic of China*) (MEE) GB 13223-2011 «Стандарт по загрязняющим выбросам ТЭС» («*Emission standard of air pollutants for thermal power plants*») [31]. В предыдущих версиях этого документа [32] был приведен расчет по определению высоты дымовой трубы, в новой же версии этот расчет отсутствует и теперь вопросом определения высоты дымовой трубы должны заниматься специализированные организации, а их расчет подтверждать МЕЕ.

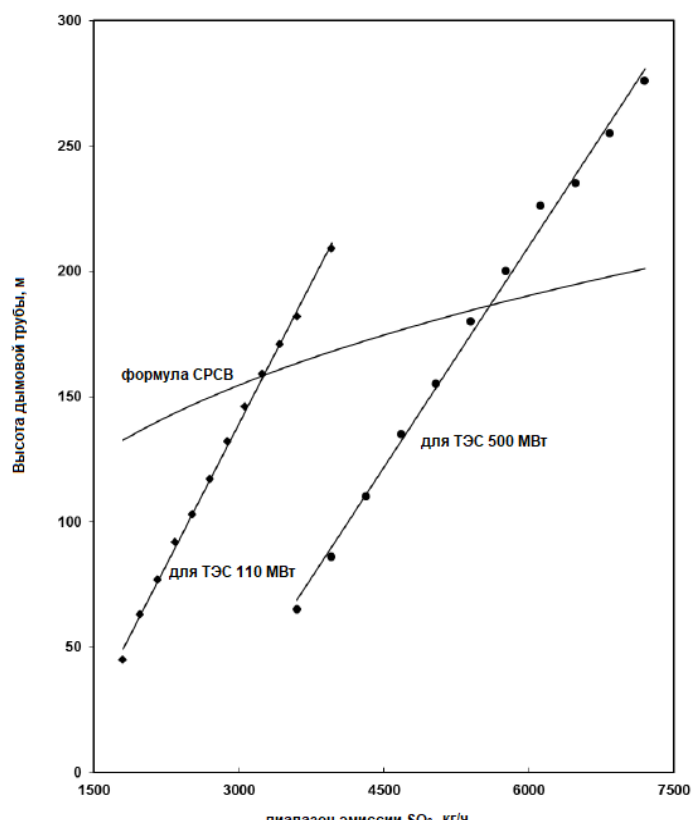


Рис. 3. Варианты определения высот дымовых труб ТЭС для г. Матхура (летний сезон)

Fig. 3. Options for determining the height of TPP chimneys for Mathura (summer season)

О скорости выхода дымовых газов, также говорится в документе «Контроль загрязнения воздуха. Инженерные технические принципы» НД2000-2010 [33] из 5.3 5.3.5 где скорости газов на выходе из трубы следует принимать 15 м/с. Если дымовая труба высокая или объемный расход газов велик то, может быть целесообразным увеличить скорость потока на выходе до 20 м/с ~ 25 м/с.

О скорости дымовых газов говорится в статье [34]. Отмечается, что, поскольку полное преимущество скорости на выходе может быть получено только при работе котельного агрегата с полной нагрузкой, тогда как дополнительная высота трубы будет полезна при любой нагрузке, делается вывод, что более экономично вложиться в дополнительную высоту трубы, чем тратить средства на дополнительную скорость на выходе. Кроме того, отмечается более высокий экологический эффект при равных затратах, а также то, что при увеличенных скоростях дымовых газов возможны нарушения в работе электрофильтров.

В [35] говорится о том, что модели рассеивания показали, что высота дымовой трубы гораздо более важна для рассеивания дымовых газов, чем плавучесть выпускаемого газа. Плавучесть выпускаемого газа (и, следовательно, дисперсия) может быть увеличена при необходимости путем повторного нагрева дымового газа, но дисперсия также может быть улучшена за счет более высокой скорости на выходе из трубы.

Результаты

Были проанализированы материалы, опубликованные ведущими учеными и специализированными фирмами. Ни одна из методик выбора основных размеров дымовой трубы, рассмотренных в приведенном списке литературы, не основана на определении оптимальной скорости выхода газов исходя из технико-экономического анализа. Выбор скорости выхода газов носит рекомендательный характер и в основном связан с условиями формирования начального участка дымового факела и не связывается со стоимостью трубы. В то же время многие исследователи в своих статьях и комментариях к нормативным документам сходятся во мнении что скорость газа на выходе из дымовой трубы является определяющей характеристикой для выбора оптимальных параметров дымовой трубы.

Для удобства сравнения методики расчета основных параметров дымовых труб приведены в табл. 1.

Сравнение методик по определению основных параметров

Великобритания	
1. Расчет индекса загрязнения, м³/с: $P_i = \frac{D}{(G_d - B_c)} \times 1000$ 2. Нескорректированная высота дымовой трубы U_b: $U_b = 10^a \cdot P_i^b,$ где для $Q \leq 1$ МВт: $a = -1,11 - 0,19 \cdot \log_{10} Q,$ $b = 0,49 + 0,005 \cdot \log_{10} Q;$ и для $Q \geq 1$ МВт: $a = -0,84 - 0,1 \cdot \exp(Q^{0,31})$ $b = 0,46 + 0,011 \cdot \exp(Q^{0,32})$ 3. Динамическая составляющая движения выбрасываемых газов M (м⁴/с²) $M = \frac{\rho_d \cdot \pi \cdot w^2 \cdot d^2}{\rho_a \cdot 4}$ 4. Высоту дымовой трубы U_m $\log_{10} U_m = x + (y \cdot \log_{10} P_i + z)^{0,5},$ где: $x = -3,7 + (\log_{10} M)^{0,9},$ $y = 5,9 - 0,624 \log_{10} M,$ и $z = 4,24 - 9,7 \cdot \log_{10} M + 1,47(\log_{10} M + 1,47(\log_{10} M)^2 - 0,07(\log_{10} M)^3)$ 5. Когда есть одно доминирующее здание, которое шире, чем высота, окончательная высота дымовой трубы C $C = H + 0,6(U + (2,5 \cdot H - U) \cdot (1 - A^{-U/H}))$ В случаях, отличных от одиночных, широких зданий: 1. Выбираются все соответствующие здания, то есть те, которые находятся на расстоянии $5 U_m$, и записываются H и B для каждого здания. 2. Оценивается K для каждого здания (меньшее из H или B). 3. Рассчитывается T для каждого здания ($T = H + 1,5 K$). 4. Находится H_m (наибольшее значение H). 5. Находится T_m (наибольшее значение T). 6. Если U больше, чем T_m, тогда $C = U$ и коррекция высоты дымовой трубы не требуется. 7. В противном случае рассчитывается скорректированная высота трубы, C, с использованием формулы:	P_i – индекс загрязнения D – скорость выброса загрязняющего вещества, в г/с; G_d – концентрация выбрасываемого загрязняющего вещества, мг/м³; B_c – фоновая концентрация выбрасываемого загрязняющего вещества для конкретного района/области или ее эквивалент B_e, мг/м³; U_b – нескорректированная высота дымовой трубы, м; a и b – вспомогательные величины; Q – тепло содержащееся в дымовых газах, МВт; ρ_d и ρ_a плотности рассеиваемых газов и атмосферного воздуха, кг/м³; w – скорость истечения газов, м/с; d – диаметр устья трубы, м; V – объемный расход истечения дымовых газов, м³/с; x, y, z – вспомогательные величины; U – нескорректированная высота дымовой трубы, меньшее из U_m или U_b, м; $A = U_m / U_b$. H – высота здания (измеряется до конька или другой наивысшей точки, без учета лифтов, резервуаров и других выступов менее 1% площади крыши), м; B – ширина здания (измеряется под прямым углом к линии, соединяющей дымовую трубу и ближайшую точку), м; K – меньшее из высоты здания H или ширины здания; T – высота возмущенного потока над зданием, определяется как $H + 1,5K$. T_m – максимальный T с учетом всех

$C = H_m + (1 - H_m / T_m)(U + (T_m - U) \cdot (1 - A^{-U/H_m}))$		соответствующих зданий. H_m - максимум H с учетом всех соответствующих зданий. C - окончательная скорректированная высота дымовой трубы.	
США			
• Не менее 65 метров при измерении от отметки уровня земли у основания дымовой трубы. • $2,5H$ (для труб, построенных до 12 января 1979 г.), или $H + 1,5 L$ (для всех других дымовых труб). • Высота определяется с учетом атмосферной турбулентности в пределах пограничного слоя и вихревых эффектов, создаваемых застройкой.		H - высота самого здания или любой значимой соседней конструкции или сооружений, м; L - меньшее из проектируемых высоты или ширины рассматриваемого зданиям.	
Испания			
1. Проверка условия применимости методики: $\Delta T > 188 \cdot \frac{V^2}{H^2} \cdot \sqrt{S}$ 2. Определение параметра A – этот параметр представляет климатологические условия места, где расположена установка, и равен: $A = 70 \cdot I_0,$ и $I_0 = \frac{\Delta T + 2\delta t}{T_m} + \frac{80}{h}$ Эта формула применима, когда $T_m > 10$ °С. Если это не так, то используется $T_m = 10$. 3. В итоге высота дымовой трубы рассчитывается следующим образом: $H = \sqrt{\frac{A \cdot Q \cdot F}{C_M}} \cdot \sqrt[3]{\frac{n}{v \cdot \Delta T}}$		ΔT - разница между температурой дымовых газов в устье дымовой трубы и средней температурой максимума самого теплого месяца. °С; V - скорость дымовых газов, м/с; H - Расчетная высота дымовой трубы, м; S - Минимальное внутреннее сечение дымохода, м². δt - разница между средней температурой самого теплого месяца и средней температурой самого холодного месяца, °С; T_m - среднегодовая температура, °С; h - средняя относительная влажность в июне, июле, августе и сентябре, в %. Эта формула применима, когда $T_m > 10$ °С. Если это не так, то используется $T_m = 10$. H – расчетная высота дымовой трубы, м; Q - максимальный расход загрязняющих веществ, кг/ч; F - коэффициент, связанный со скоростью осаждения загрязняющих веществ в атмосфере. Для газообразных загрязнителей $F = 1$, а для твердых частиц и других тяжелых примесей $F = 2$; n - количество дымовых труб, расположенных на расстоянии менее $2 \cdot H$ по горизонтали от исследуемой дымовой трубы; v - расход дымовых газов, м³/ч; C_m - максимальная концентрация загрязняющих веществ на уровне земли, выражается в мг/м³ (среднее значение за 24 часа).	
Швеция			
Правила разработанные Шведским метеорологический и гидрологический институтом (SHMI) для SEPA			
Германия			
Номограмма TA LUFT для определения высоты дымовой трубы или компьютерная программа BESMIN			
Индия			
Формула, разработанная CPCB и утвержденная правительством Индии: $H = 14 \cdot Q^{0,3}$		H - физическая высота трубы, м; Q – объемный расход SO ₂ , кг/ч;	
Эмпирическая формула для расчета высоты дымовой трубы для ТЭС мощностью 110 МВт [29]			
Регион (время года)	Выведенная формула	Диапазон эмиссии SO ₂ (кг/ч)	R ²

Матхура (летний сезон)	$H = 0,075Q - 85,6$	От 1800 до 3960	0,9984
Панипат (летний сезон)	$H = 0,0887Q - 118,6$	От 1800 до 3960	0,9967
Джагдишпер (зимний сезон)	$H = 0,9201 \cdot Q^{0,5895}$	От 1800 до 3960	0,9972
Сатна (зимний сезон)	$H = 0,3153 \cdot Q^{0,6895}$	От 1800 до 3060	0,9973
	$H = 7e - 12 \cdot Q^{3,7511}$	От 1800 до 3960	0,9933
Эмпирическая формула для расчета высоты дымовой трубы для ТЭС мощностью 500 МВт [29]			
Регион (время года)	Выведенная формула	Диапазон эмиссии SO ₂ (кг/ч)	R ²
Матхура (летний сезон)	$H = 0,0589 \cdot Q - 143,3$	От 3600 до 7200	0,9956
Панипат (летний сезон)	$H = 0,0656 \cdot Q - 180$	От 3600 до 7200	0,9945
Джагдишпер (зимний сезон)	$H = 0,3086 \cdot Q^{0,6619}$	От 3600 до 7560	0,991
Сатна (зимний сезон)	$H = 0,0752 \cdot Q^{0,7846}$	От 4320 до 6660	0,9969
	$H = 4e - 19 \cdot Q^{5,2945}$	От 6660 до 7560	0,9912
Китай			
«Контроль загрязнения воздуха. Инженерные технические принципы» HJ2000-2010			

Обсуждение

К положительным моментам в методике [2] можно отнести тот факт, что при расчете учитывается тепловая и динамическая составляющая, а также информации о выбросах в данном районе и ближайших источниках выбросов. В [2] и [8] на учитывается ландшафт, плотность и высота застройки.

В большинстве рассмотренных нормативных документах приведены рекомендации для установок малой и средней мощности, поэтому даются упрощенные расчеты и общие рекомендации по выбору оптимальных параметров. В свою очередь расчет рассеивания примеси для крупных установок проводится с помощью метеорологических моделей, компьютерного моделирования и испытаний в аэродинамической трубе, а затем утверждаться государственным регулирующим органом.

В результате аналитического обзора получены данные для разработки наиболее целесообразных направлений дальнейших научных исследований в области определения оптимальных параметров дымовых труб.

Одним из таких направлений может быть учет особенностей работы дымовых труб в переходной период к «Зеленой энергетике». Уже сейчас можно констатировать, что ряд стран, и особенно Германия, встали на путь практической реализации данного подхода. Им уже недостаточно такого экологически чистого вида топлива как природный газ. Они хотят получить топливо, при использовании которого не выбрасывается двуокись углерода. Таким топливом может стать водород. Причем не просто водород, а тот, при производстве которого не было выбросов CO₂ в атмосферу. Это может быть или «Атомный водород», произведенный путем электролиза воды за счет электроэнергии, полученной на АЭС, или «Зеленый водород», получаемый также путем электролиза воды, но за счет электроэнергии, получаемых с помощью возобновляемых источников энергии. Этот водород планируется в дальнейшем использовать в топливных элементах.

Однако в переходной период, который будет продолжаться еще несколько десятилетий, этот водород будет сжигаться в камерах сгорания газовых турбин (что уже реализуется), а также в котельных установках. Россия имеет хорошие возможности для выработки и поставки потребителям такого топлива.

Предполагается использовать для поставки водорода существующие газопроводы. По-видимому, это будет делаться за счет постепенного увеличения доли водорода в природном газе и дальнейшее сжигание такого топлива в энергетических установках. Для такого топлива потребуются корректировка условий сжигания, в т.ч. модернизация горелок, чтобы не допустить контакта водорода с металлом при высоких температурах в топке.

Продукты сгорания при этом будут насыщаться парами воды и оксидами азота. Изменение состава продуктов сгорания потребует учесть это при анализе надежности дымовых труб и выработке оптимальных условий их проектированию.

Заключение

Как и [1], [2] так и рассмотренные иностранные нормативные документы не учитывают важнейшие характеристики при определении оптимальных параметров дымовых труб. Российская методология выбора оптимальных параметров дымовой трубы, основанная Л.А. Рихтером [36] является передовой и в настоящее время. Эта методика получила развитие в работах [37–40]. Аналогичных исследований в зарубежных источниках не найдено, поставленные в них задачи актуальны и требуют дальнейшего развития.

Литература

1. Приказ Минстроя России от 14.12.2017 №1667/пр «об утверждении свода правил трубы промышленные дымовые. правила проектирования».
2. СП 375.1325800.2017. Трубы промышленные дымовые. Правила проектирования. М.: Изд-во стандартов, 2018.
3. Model Code for Steel Chimneys - the CICIND Chimney Standard, ISBN 1-902998-16-2, Revision 2010, Zürich, Switzerland.
4. Environment Act 1995 - Act Chapter 25 1995. Department of the Environment London. H.M.S.O.
5. Environmental Protection Act 1990, 1993. Technical Guidance Note (Dispersion) D1, Guidance's on Discharge Stack Heights for Polluting Emissions, London: HMIP.
6. The Third Edition of the 1956 Clean Air Act Memorandum on Chimney Heights (Department of the Environment, (1981)) London. H.M.S.O.
7. The Clean Air Act 1993/Act Chapter 25. 1993. Department of the Environment London. H.M.S.O.
8. EPA. "Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document for the Stack Height Regulation) Revised," USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-45014-80-023R, 1985.
9. EPA, "Guideline for Use of Fluid Modeling to Determine Good Engineering Practice Stack Height," USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-450/4-81-003, July 1981.
10. Ronald L. Petersen «Justifying a GEP Stack Height Taller than the EPA Formula Height» June 2015 108th Annual A&WMA Conference and Exhibition At: Raleigh, NC
11. Greenway A.R., Cermak J.E., Petersen R.L and H.C. McCullough. "Physical Modeling Studies for GEP Stack Height Determinations," 74th Annual Meeting of the APCA, Paper No. 81-20.3, CEP80-81 JAP-JEC33, Philadelphia, Pennsylvania, June 21-26, 1981.
12. Halitsky J.A., Petersen R.L., Taylor S.D., et al. "Nearby Terrain Effects on a Good Engineering Practice Stack Height," paper to be presented at 79th Annual APCA Meeting in Minneapolis, Minnesota, 1986.
13. Petersen R.L., Parce D.K., West J.L., et al. "Effect of a Nearby Hill on Good Engineering Practice Stack Height," 86th Annual APCA Conference, Denver, CO, June 14-18, 1993.
14. Petersen R.L. "Fluid Modeling for Good Engineering Practice Stack Height at Homer City Generating Station," prepared for TRC Environmental Consultants, Inc., East Hartford, CT, by Cermak Peterka Petersen, Inc., Report No. 86-0338, October, 1987.
15. Snyder W.H. "Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion," USEPA, Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, Research Triangle Park, North Carolina, Report No. EPA600/8-81-009, 1981.
16. EPA. AERSURFACE User's Guide, EPA-454/B-08-001, USEPA Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division, Air Quality Modeling Group, Research Triangle Park, North Carolina, 2008.
17. Petersen R.L. and A. Beyer-Lout. Fluid Modeling Good Engineering Practice Stack Height Determination for the Rhinelander Mill Stack S09, CPP Report 7835, October 2014.
18. Panofsky and Dutton. "Atmospheric Turbulence," John Wiley & Sons, Inc., 1984.
19. Cimorelli A.J., Perry S.G., Venkatram A., et al. "AERMOD: Description of Model Formulation," EPA-454/R-03-004, September 2004.
20. Petersen R.L. "Dispersion Comparability of the Wind Tunnel and Atmosphere for Adiabatic Boundary Layers with Uniform Roughness," Seventh Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Boulder, CO, November 12-15, 1985.
21. Thomas F.W., Carpenter S.B. & Gartrell F.E. (1963) Stacks-How High? Journal of the Air Pollution Control Association, 13:5, 198-204. doi: 10.1080/00022470.1963.10468165.

22. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, Official Journal L 332.
23. Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo. Ministry of Industry, Spain.
24. Sweden Environmental Protection Agency regulations amending the Environmental Protection Agency regulations (NFS 2002:26) on air emissions of sulphur dioxide, nitrogen oxides and dust from combustion installations with a rated thermal input of 50 MW or more, of 31st March 2010).
25. Technical Instructions on Air Quality Control- TA Luft of 24 July 2002. Federal Ministry of Environment, Germany.
26. Central Board for the prevention and control of water pollution, New Delhi, (1985). A method to determine the minimum stack height, Control of Urban Pollution Series: CUPS/13/1984-85.
27. Central Pollution Control Board, (1994). Report on Design and operating parameters of Electrostatic Precipitators, Programme Objective Series: PROBES/45/1992, September 1994, pp.3, 20-22.
28. Central Pollution Control Board, (1996). Pollution Control Acts, Rules, and Notifications issued thereunder, Pollution Control Series: PCL/2/1992 (V.1).
29. George KV, Chalapati Rao CV, Labhsetwar P K and Hasan M. Z. 2002 “Minimum Stack Height Formula for Coal Based Thermal Power Plant in Northern India” J. Institut. Engineers (India), Environ. Engg. Div. 2002.V. 82. pp 31-34.
30. National Standard of the People’s Republic of China. GB 13223–2011: Emission standard of air pollutants for thermal power plants. Chinese standard. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC; 2011. Chinese.
31. National Standard of the People’s Republic of China. GB 13223–2003: Emission standard of air pollutants for thermal power plants. Chinese standard. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC; 2003. Chinese.
32. National Standard of the People’s Republic of China. HJ 2000-2010: Technical guidelines for air pollution control projects; 2010. Chinese.
33. Von Hohenleiten H.L. & Kent R.H. (1954) Economic and Engineering.
34. Considerations in the Design of Stacks for Good Gas Dispersion, Air Repair, 3:3, 195-200, doi:10.1080/00966665.1954.10467628.
35. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control) JOINT RESEARCH CENTRE Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau Final Draft (June 2016).
36. Рихтер Л.А. Тепловые электрические станции и защита атмосферы. М., «Энергия», 1975, 312 с.
37. Zroichikov N.A., Saparov M.I., Gribkov A.M., Mirsalikhov K.M. A general-purpose procedure for the calculation of the optimum gas velocity in gas exhaust ducts of stacks at thermal power stations. Thermal Engineering. 2020. Т. 67. № 3. pp. 157-164. doi: 10.1134/S0040601520030064
38. Zroichikov N.A., Gribkov A.M., Saparov M.I., Mirsalikhov K.M. Analysis of the Benefits of TPP’s Three-Barrel Smokestacks. Thermal Engineering. 2020. Т. 67. №9 pp. 610–616. doi: 10.1134/S0040601520090116.
39. Gribkov A.M., Chichirova N.D., Fedorenkov D.I. Modelling of the Initial Part of a Smoke Plume from a Four-Flue Stack at a Thermal Power Station. Thermal Engineering. 2020. Т. 67. №10 pp. 724–732. doi: 10.1134/S0040601520100043.
40. Gribkov A.M., Zroichikov N.A. & Prokhorov V.B. Plume trajectory formation under stack tip self-enveloping. Thermal Engineering. 2020. Т. 64. №10 pp. 745–752 (2017). doi: 10.1134/S0040601517100032.

Авторы публикации

Мирсалихов Кирилл Маратович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Грибков Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры Тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет.

Чичирова Наталья Дмитриевна – д-р хим. наук, профессор, действительный член РАЕН, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Заслуженный деятель

науки РТ, эксперт фонда «Сколково» руководитель научной школы «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии процессов и производств в теплоэнергетике», заведующая кафедрой «Тепловые электрические станции» и Директор института Теплоэнергетики, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Prikaz Ministroja Rossii ot 14.12.2017 №1667/pr "Ob utverzhdenii svoda pravil "truby promyshlennye dymovye. pravila proektirovanija (Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 14, 2017 No. 1667 / On the approval of the set of rules" industrial smoke pipes. design rules "
2. SP 375.1325800.2017. *Truby promyshlennye dymovye. Pravila proektirovanija*. M.: Izd-vo standartov, 2018. (SP 375.1325800.2017. Industrial chimneys. Design rules. M.: Publishing house of standards, 2018.)
3. *Model Code for Steel Chimneys - the CICIND Chimney Standard*, ISBN 1-902998-16-2, Revision 2010, Zürich, Switzerland.
4. Environment Act 1995 - Act Chapter 25 1995 - Department of the Environment London. H.M.S.O.
5. Environmental Protection Act 1990, 1993. *Technical Guidance Note (Dispersion) D1, Guidance's on Discharge Stack Heights for Polluting Emissions*, London: HMIP.
6. *The Third Edition of the 1956 Clean Air Act Memorandum on Chimney Heights* (Department of the Environment, (1981)) London. H.M.S.O.
7. The Clean Air Act 1993 - Act Chapter 25 1993 - Department of the Environment London. H.M.S.O.
8. EPA, "Guideline for Determination of Good Engineering Practice Stack Height (Technical Support Document for the Stack Height Regulation) Revised," USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-45014-80-023R, 1985.
9. EPA, "Guideline for Use of Fluid Modeling to Determine Good Engineering Practice Stack Height," USEPA Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-450/4-81-003, July 1981.
10. Ronald L. Petersen *Justifying a GEP Stack Height Taller than the EPA Formula Height June*. 2015 108th Annual A&WMA Conference and Exhibition At: Raleigh, NC
11. Greenway AR., J.E. Cermak, R. L. Petersen, and H.C. McCullough, "Physical Modeling Studies for GEP Stack Height Determinations," 74th Annual Meeting of the APCA, Paper No. 81-20.3, CEP80-81 JAP-JEC33, Philadelphia, Pennsylvania, June 21-26, 1981.
12. Halitsky JA, Petersen RL, Taylor SD, et al. "Nearby Terrain Effects on a Good Engineering Practice Stack Height," paper to be presented at 79th Annual APCA Meeting in Minneapolis, Minnesota, 1986.
13. Petersen RL, Parce DK, West JL, et al. "Effect of a Nearby Hill on Good Engineering Practice Stack Height," 86th Annual AWMA Conference, Denver, CO, June 14-18, 1993.
14. Petersen RL. "Fluid Modeling for Good Engineering Practice Stack Height at Homer City Generating Station," prepared for TRC Environmental Consultants, Inc., East Hartford, CT, by Cermak Peterka Petersen, Inc., Report No. 86-0338, October, 1987.
15. Snyder W.H. "Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion," USEPA, Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, Research Triangle Park, North Carolina, Report No. EPA600/8-81-009, 1981.
16. EPA. AERSURFACE User's Guide, EPA-454/B-08-001, USEPA Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division, Air Quality Modeling Group, Research Triangle Park, North Carolina, 2008.
17. Petersen RL. and A Beyer-Lout. *Fluid Modeling Good Engineering Practice Stack Height Determination for the Rhinelander Mill Stack S09*, CPP Report 7835, October 2014.
18. Panofsky and Dutton. "Atmospheric Turbulence," John Wiley & Sons, Inc., 1984.
19. Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, et al. "AERMOD: Description of Model Formulation," EPA-454/R-03-004, September 2004.
20. Petersen RL. "Dispersion Comparability of the Wind Tunnel and Atmosphere for Adiabatic Boundary Layers with Uniform Roughness," Seventh Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Boulder, CO, November 12-15, 1985.
21. Thomas FW., Carpenter S.B. & Gartrell F.E. (1963) Stacks-How High? *Journal of the Air Pollution Control Association*, 13:5, 198-204, doi: 10.1080/00022470.1963.10468165.
22. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, *Official Journal L* 332.
23. Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de

grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo. Ministry of Industry, Spain.

24. Sweden Environmental Protection Agency regulations amending the Environmental Protection Agency regulations (NFS 2002:26) on air emissions of sulphur dioxide, nitrogen oxides and dust from combustion installations with a rated thermal input of 50 MW or more, of 31st March 2010.

25. Technical Instructions on Air Quality Control- TA Luft of 24 July 2002. *Federal Ministry of Environment, Germany.*

26. *Central Board for the prevention and control of water pollution, New Delhi, (1985). A method to determine the minimum stack height, Control of Urban Pollution Series: CUPS/13/1984-85.*

27. Central Pollution Control Board, (1994). *Report on Design and operating parameters of Electrostatic Precipitators*, Programme Objective Series: PROBES/45/1992, September 1994, pp.3, 20-22.

28. *Central Pollution Control Board, (1996). Pollution Control Acts, Rules, and Notifications issued thereunder, Pollution Control Series: PCL/2/1992 (V.1).*

29. George KV, Chalapati Rao C V, Labhsetwar PK and Hasan M.Z. “Minimum Stack Height Formula for Coal Based Thermal Power Plant in Northern India. *J. Institut. Engineers (India), Environ. Engg. Div., 2002;82:31-34.*

30. *National Standard of the People’s Republic of China. GB 13223–2011: Emission standard of air pollutants for thermal power plants. Chinese standard. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC; 2011. Chinese.*

31. *National Standard of the People’s Republic of China. GB 13223–2003: Emission standard of air pollutants for thermal power plants. Chinese standard. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC; 2003. Chinese.*

32. *National Standard of the People’s Republic of China. HJ 2000-2010: Technical guidelines for air pollution control projects; 2010. Chinese.*

33. Von Hohenleiten HL. & Kent RH (1954) *Economic and Engineering.*

34. *Considerations in the Design of Stacks for Good Gas Dispersion, Air Repair, 3:3, 195-200, doi:10.1080/00966665.1954.10467628.*

35. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control) JOINT RESEARCH CENTRE Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau Final Draft (June 2016).*

36. Rihter L.A. *Teplovye jelektricheskie stancii i zashhita atmosfery. Thermal power plants and protection of the atmosphere. M., «Jenergija», 1975, 312 pages.*

37. Zroichikov NA, Saparov MI, Gribov AM, Mirsalikhov K.M. A general-purpose procedure for the calculation of the optimum gas velocity in gas exhaust ducts of stacks at thermal power stations. *Thermal Engineering. 2020;67(3):157-164. doi: 10.1134/S0040601520030064.*

38. Zroichikov NA, Gribov AM, Saparov MI, Mirsalikhov KM. Analysis of the Benefits of TPP’s Three-Barrel Smokestacks. *Thermal Engineering. 2020;67(9):610–616. doi: 10.1134/S0040601520090116.*

39. Gribov AM, Chichirova ND, Fedorenkov DI. Modelling of the Initial Part of a Smoke Plume from a Four-Flue Stack at a Thermal Power Station. *Thermal Engineering. 2020;67(10):724–732. doi: 10.1134/S0040601520100043.*

40. Gribov AM, Zroichikov NA. & Prokhorov VB. Plume trajectory formation under stack tip self-enveloping. *Thermal Engineering. 2020;64(10):745–752 (2017). doi: 10.1134/S0040601517100032.*

Authors of the publication

Kirill M. Mirsalikhov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Aleksandr M. Gribov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Natalia D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

01 марта 2021г.

Отредактировано

05 марта 2021г.

Принято

05 марта 2021г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.3.056.5

DOI:10.30 724/1998-9903-2021-23-1-146-155

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.И. Федотов¹, Г.В. Вагапов¹, А.Ф. Абдуллазянов¹, А.М. Шаряпов²

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия
vagapov@list.ru

Резюме. ЦЕЛЬ. Внедрение цифровой системы мониторинга однофазных замыканий на землю на воздушных линиях электропередачи в распределительных электрических сетях напряжением 10 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. МЕТОДЫ. Реализация программного обеспечения осуществлена на основе использования математических моделей имитационного моделирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье представлена внедренная цифровая система мониторинга повреждений на воздушных линиях электропередачи напряжением 10 кВ с изолированным режимом работы нейтрали в действующих распределительных электрических сетях, основанная на выделении высших гармонических составляющих токов и напряжений, как один из технических вариантов решения проблемы определения однофазных замыканий на землю. Представлены особенности технических решений по выделению полезных сигналов, реализованных в цифровой системе мониторинга. Одновременно, приведены компоновочные решения по подключению системы мониторинга к вторичным измерительным цепям в распределительном устройстве 10 кВ подстанции 110/10 кВ. На основе выше обозначенных технических решений и ранее разработанных математических моделей, а также с учетом результатов серий натурных экспериментов по моделированию различных видов однофазных замыканий на землю в действующих распределительных электрических сетях, реализовано программное обеспечение дистанционного мониторинга распределительной электрической сети и выявления различных видов однофазных замыканий на землю. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представлены основные функционалы разработанного программного обеспечения с описанием решений отдельных технических задач. Приведены дальнейшие направления исследований в области диагностики и мониторинга однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях, выполненных воздушными линиями электропередачи на основе анализа высших гармонических составляющих.

Ключевые слова: мониторинг, линии электропередачи, цифровая система, программное обеспечение, замыкание на землю.

Для цитирования: Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., Шаряпов А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 146-155. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155.

DIGITAL POWER LINES FAULTS MONITORING SYSTEM

AI. Fedotov¹, GV. Vagapov¹, AF. Abdullazyanov¹, AM. Sharyapov²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
vagapov@list.ru

Abstract. *THE PURPOSE.* paper show digital system for monitoring of single-phase earth faults on overhead power lines of 10 kV voltage in distribution power grids with an isolated neutral mode. *METHODS.* Digital system analyze frequency and amplitude of higher harmonics of voltage and current. The digital monitoring system includes the features of technical solutions for the selection of higher harmonics. *RESULTS.* Simultaneously, the paper shows the layout solutions for connecting a monitoring system to the control circuits on the 10 kV side of 110/10 kV voltage substation. Software implemented for the far monitoring of the power grids and can detect of various types of single-phase earth faults. *CONCLUSION.* Software base on the mathematical models, as well as taking into account the results of a series of full-scale experiments of modeling various types of single-phase earth faults in the distribution power grids. The main functionalities the developed software presented for the description of solutions. Paper show further directions of research of the diagnostics and monitoring of single-phase earth faults in distribution power grids with overhead power lines based on the analysis of higher harmonic components.

Keywords: Monitoring, power lines, digital system, software, earth fault.

For citation: Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullazyanov AF, Sharyapov AM. Digital power lines faults monitoring system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):146-155. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155.

Введение и литературный обзор

Проблема однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических распределительных сетях напряжением 6-10-35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали (РЭС) не нова и является актуальной в настоящее время [1, 2, 3, 4, 5], не смотря на значительное количество ежегодно публикуемых работ по данной тематике [6, 7, 8]. Исторически ретроспектива решения обозначенной проблемы [9] указывает на существенное количество задействованных ресурсов, как временных, так и научно-практических. Данное обстоятельство связано, в первую очередь с вариативностью видов ОЗЗ [10, 11, 12, 13, 14]. Во-вторых, физические процессы в РЭС, протекающие при ОЗЗ, определяются параметрами режимов функционирования не только РЭС, но и потребителей, получающих питание на рассматриваемом классе напряжения [15, 16, 17, 18, 19]. Совокупность данных параметров определяет существенную вариативность конечных процессов в РЭС в режиме ОЗЗ, и как следствие, отсутствие единого диагностического признака наступления режима ОЗЗ, в отличие от других аварийных режимов, где, как правило, присутствует один диагностический признак, позволяющий осуществить построение систем релейной защиты и автоматики, основанных на результатах его измерений [20, 24]. Соответственно, проводимые исследования по данной проблеме стараются выявить несколько диагностических признаков, проявляющихся при всем многообразии как видов ОЗЗ, так и вариативности режимов функционирования РЭС и потребителей.

Ранее опубликованные результаты исследований предлагают различные технические решения, основанные на: использовании высших гармонических составляющих [1-4] и использовании результатов математического моделирования параметров воздушных линий в режиме повреждения [5-6]. Идентификация резонансных высших гармонических составляющих напряжения возможна как на шинах питающих подстанций, так и на шинах 0,4 кВ потребительских подстанций. Так, на шинах питающих подстанций всегда устанавливается измерительный трансформатор напряжения, имеющий две вторичные обмотки: одну, собранную по схеме «звезда с нулём», и вторую – «разомкнутый треугольник», которую используют для выявления по напряжению нулевой последовательности самого факта ОЗЗ.

Также необходимо выделить классические общепринятые подходы к решению проблемы ОЗЗ [8, 9, 10, 11, 12, 24] различных отечественных школ, что еще раз подчеркивает важность поиска решений обозначенной проблемы. Обобщенно, в кратком виде, выделяются следующие особенности представленных подходов: волновые методы определяют моменты прихода на подстанцию возникающих в месте повреждения линии электромагнитных волн; локационные методы основаны на измерении времени между моментом времени послышки в ВЛ зондирующего импульса и моментом прихода к началу линии импульса отраженного от места повреждения. За указанное время импульсы проходят путь равный двойному расстоянию до места повреждения; метод стоячих волн использует измерение полного входного сопротивления, поврежденной линии в

широком диапазоне частот. Расстояние между резонансными частотами, т.е. максимальное и минимальное входные сопротивления зависят от расстояния до места повреждения; петлевой метод основан на измерении сопротивления постоянному току жил кабеля, отключенного из-за пробоя фазы на землю. Переходное сопротивление в месте повреждения предварительно снижают прожиганием изоляции от специальных источников тока; емкостной метод определяет емкость жилы от места измерения до места обрыва; Метод определения места повреждения по параметрам аварийного режима основан на измерении параметров сети в момент возникновения КЗ.

Одновременно с отечественными школами имеется существенное количество публикаций зарубежных исследователей [13, 14, 15, 22] по проблеме замыканий на землю с вариативностью предлагаемых как теоретических подходов, так и практически реализованных технических решений. Однако, не смотря на наличие, как классических школ, так и новых теоретических и практических направлений, актуальность проблемы ОЗЗ не снижается.

Материалы и методы

Представленная актуальность проблемы раннего выявления ОЗЗ явилась основанием для проведения теоретических исследований мониторинга ОЗЗ и выявления диагностических признаков, проявляющих себя в равной степени при различных видах ОЗЗ таких, как например, «металлические замыкания», перемежающиеся дуговые замыкания, кратковременные замыкания через дерево и т.д. Теоретические модели и результаты моделирования достаточно подробно описаны в [1-3].

Теоретическое моделирование было осуществлено на программно-аппаратном комплексе RTDS. Рис.1 в качестве примера иллюстрирует фрагмент имитационной схемы РЭС с открытым диалоговым окном ввода параметров источника напряжения. В моделируемой схеме РЭС от шин питающей подстанции отходят четыре воздушных линии электропередачи (ВЛ) длиной 16 км, а на пятой линии в середине имеет место ОЗЗ с различными моделируемыми параметрами.

На рис. 2 в качестве примера представлены осциллограммы фазного напряжения на шинах питающей подстанции, когда переходное сопротивление в месте ОЗЗ равно нулю. Графики иллюстрируют, что форма напряжения поврежденной фазы практически однозначно имеет отличия по форме, что позволяет выделять повреждение.

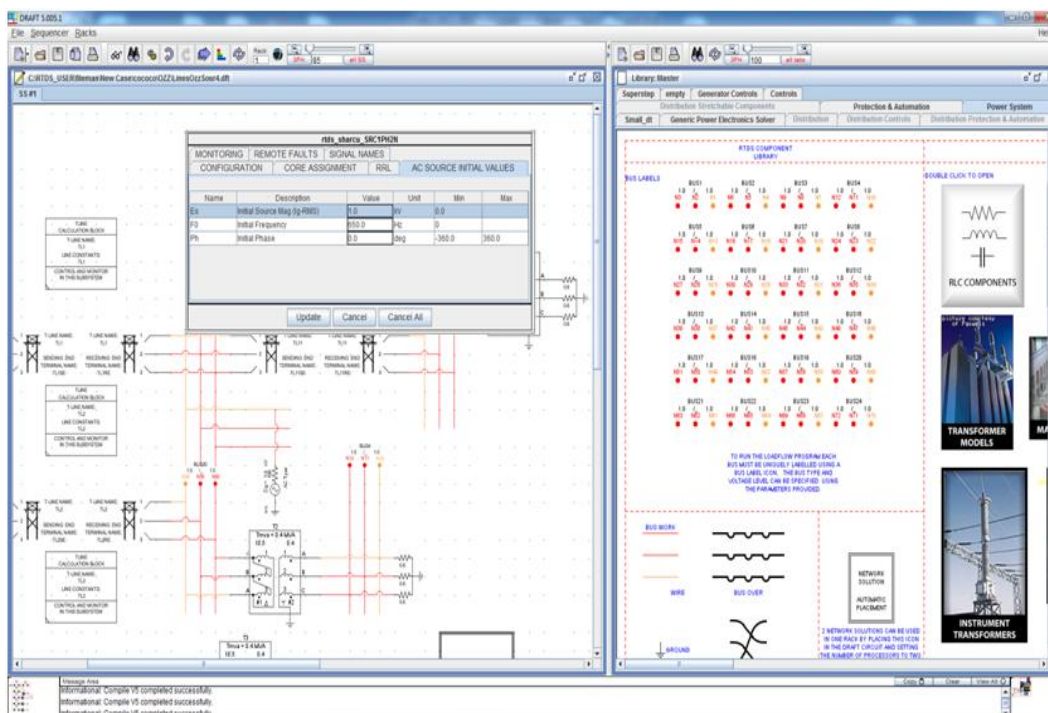


Рис.1. Фрагмент имитационной схемы РЭС с открытым диалоговым окном ввода параметров источника напряжения

Fig.1. A fragment of the simulation circuit of the RES with an open dialog box for entering voltage source parameters

Одновременно с теоретическими исследованиями были реализованы серии

натурных экспериментов в действующих РЭС с целью сопоставления теоретических и экспериментальных результатов, показавшие их сходимость, что представлено в [4]. Сходимость теоретических результатов с результатами натурных экспериментов позволила перейти непосредственно к созданию цифровой системы мониторинга повреждений на воздушных линиях электропередачи в распределительных сети напряжением 10 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. В основе цифровой системы находятся математические модели, полученные в результате теоретических исследований [1-3].

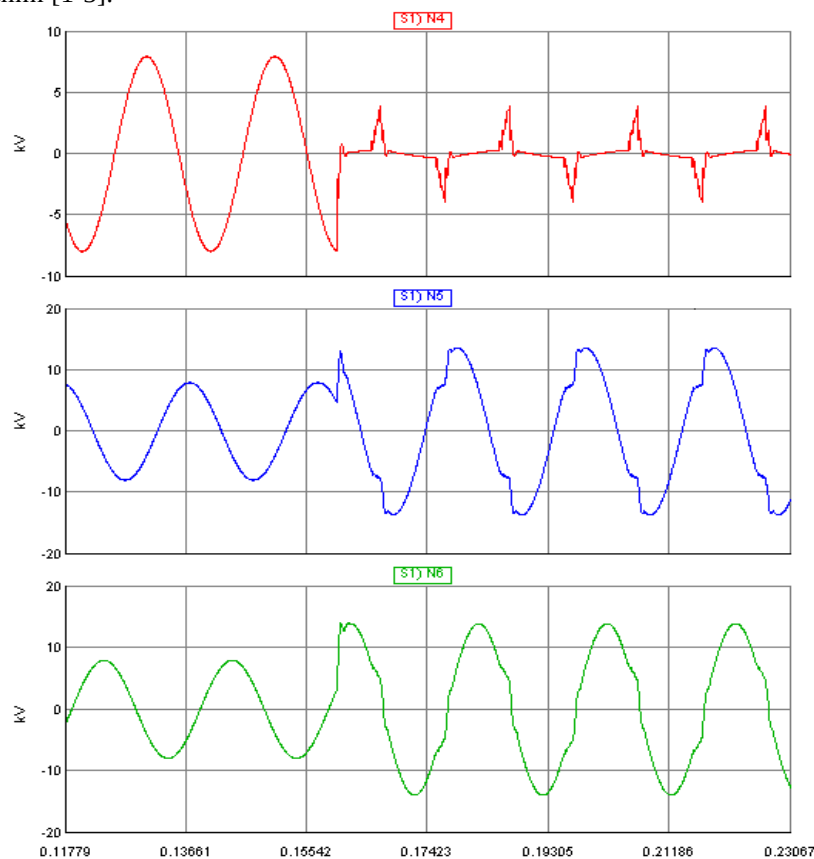


Рис. 2. Фазные напряжения на шинах питающей подстанции

Fig.2. Phase voltages on the busbars of the supply substation

Наиболее важные функциональные свойства схемного решения системы пофидерного контроля однофазных замыканий на землю для воздушных линий 6-10 - 35 кВ, характеризующие основное назначение системы, заключаются в следующем:

- осуществление непрерывного мониторинга отходящих фидеров на подстанции, заключающегося в проведении анализа спектра высших гармонических составляющих тока и напряжения;
- выявление превышений значений высших гармонических составляющих токов и напряжение на отходящих фидерах;
- сигнализация о превышении значений высших гармонических составляющих токов и напряжений на отходящем фидере;
- локализация отходящего фидера с однофазным замыканием на землю;
- передача информации на компьютер в диспетчерском пункте;
- визуализация информации о повреждении на компьютере в диспетчерском пункте.

Цифровая система условно подразделяется на две части, а именно, база данных, установленная на сервере в распределительном устройстве 10 кВ подстанции 110/10 кВ, и клиентское приложение, установленное на АРМ в диспетчерской. База данных организованная по классическому сценарию сбора и хранения данных, получает первичные данные с вторичных цепей каждого отходящего фидера. В качестве первичных данных выступают значения амплитуд и частот напряжений и токов. Далее осуществляется процесс обработки первичных данных, согласно математических моделей, представленных в [1-3]. Результаты обработки первичных данных визуализируются на экране АРМ диспетчера в виде основного диалогового окна цифровой системы мониторинга, рис.3.

Цифровая система позволяет отображать информацию по параметрам напряжения по каждой из секций шин. Рис.4 в качестве примера визуализирует фотографию диалогового окна параметров напряжения на первой секции шин. Представлена возможность визуализации фазных значений напряжений, по фазного гармонического состава напряжений, амплитуды значений напряжения нулевой последовательности и по фазного коэффициента гармонических искажений.



Рис. 3. Фотография основного диалогового окна цифровой системы на АРМ диспетчера
Fig.3. Photo of the main dialog box of the digital system on the dispatcher's WORKSTATION

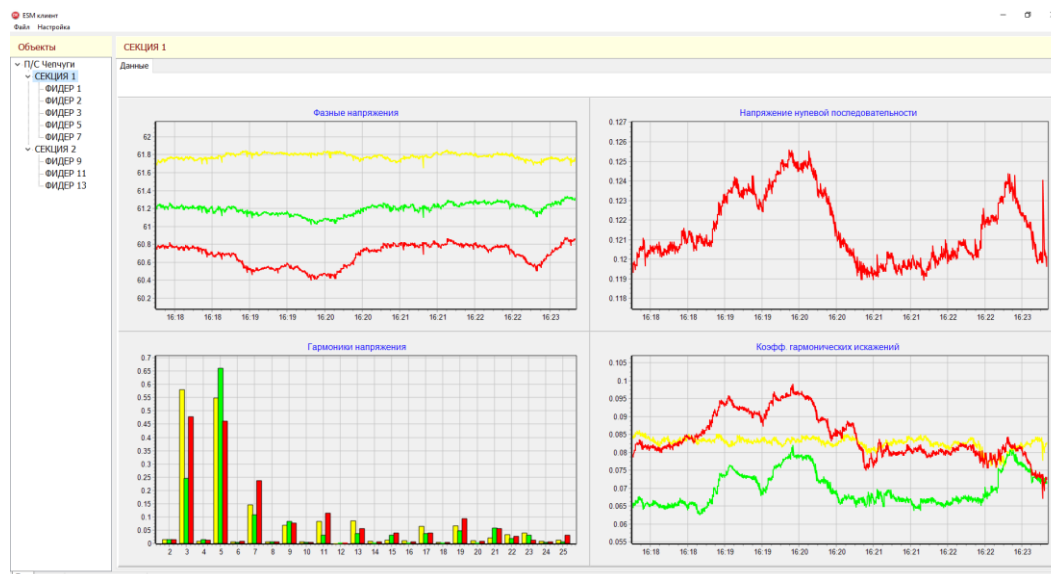


Рис.4. Фотография диалогового окна оценки параметров напряжений на секции шин
Fig.4. Photo of the bus section Voltage parameter estimation dialog box

В качестве примера для демонстрации результатов цифровой системы мониторинга представлены результаты мониторинга ОЗЗ через большое сопротивление при интенсивном снегопаде. Рис.5 иллюстрирует гармонический анализ токов на первом фидере. Значения ВГ тока находятся в пределах 0,002 от значения первой гармоники. Значение коэффициента гармонических искажений находится в пределах менее 0,003. Рис.4 иллюстрирует аналогичный анализ токов на девятом фидере соседней секции шин. Значения ВГ токов находят аналогично значениям на первом фидере. Рис.7 иллюстрирует гармонический анализ одиннадцатого фидера, на котором произошло ОЗЗ через большое переходное сопротивление. Анализ фазных токов визуализирует броски по току. Однако данные броски по току могут быть присущи не только лишь режиму

перемежающегося ОЗЗ, но и характерны для нагрузки с резко переменным характером. Причин подобных бросков по току может быть множество. Одновременно и ток нулевой последовательности равен нулевому значению. Однако гармонический анализ демонстрирует увеличение ВГ тока по одиннадцатому фидеру в десять раз, что однозначно определяет его, как фидер с повреждением. Картина сопоставления по фазных ВГ тока не дает однозначный ответ на определение фазы с повреждением. Такой случай ОЗЗ является наиболее сложно выявляемым.

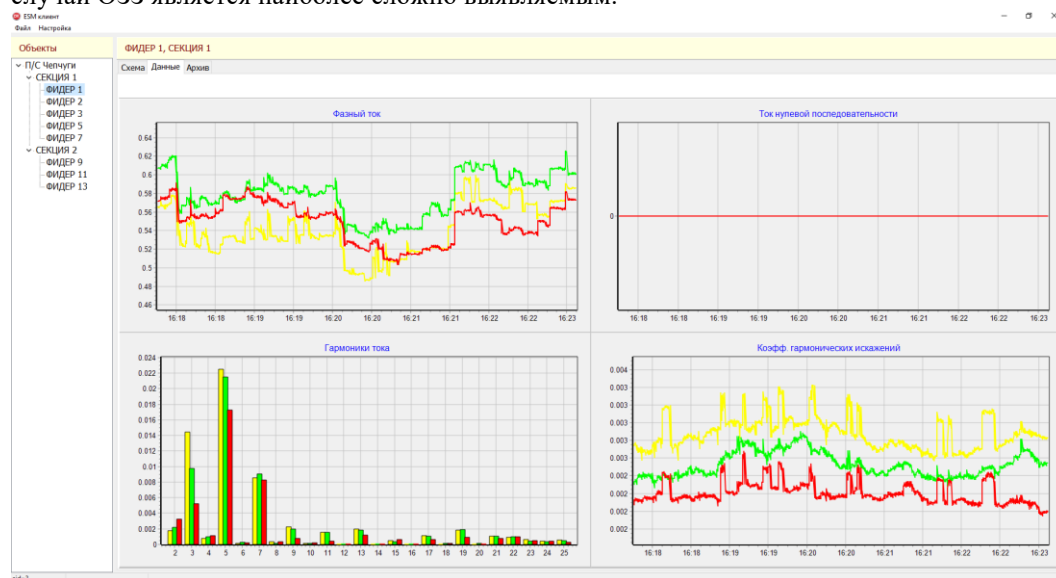


Рис.5. Фотография диалогового окна ВГ тока на первом фидере в режиме ОЗЗ через большое сопротивление

Fig.5. Photo of the VG current dialog box on the first feeder in the OZZ mode through a large resistance

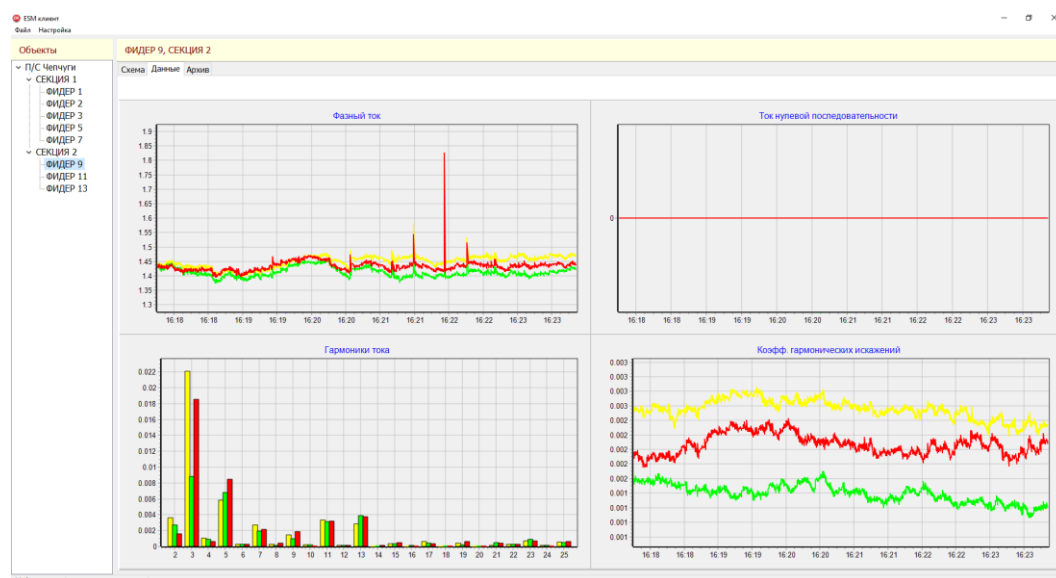


Рис.6. Фотография диалогового окна ВГ тока по девятому фидеру в режиме ОЗЗ через большое сопротивление

Fig.6. Photo of the VG current dialog box on the ninth feeder in the OZZ mode through a large resistance

Однозначно фазу с повреждением визуализирует диалоговое окно ПО, демонстрирующее коэффициент гармонических искажений, рис. 5. Необходимо также отметить существенный рост четных гармоник, что не является классическим случаем и подлежит дальнейшему исследованию.

Одновременно в цифровой системе мониторинга повреждений на воздушных линиях электропередачи предусмотрено диалоговое окно с поопорной схемой отходящих фидеров. Рис.6 в качестве примера иллюстрирует по опорную схему одного

из отходящих фидеров. Данная схема предполагает визуализацию зоны поиска места повреждения. Одновременно имеется возможность инсталляции геоподложки места прохождения ВЛ, что также существенно снизить затраты временного ресурса на поиск места ОЗЗ.

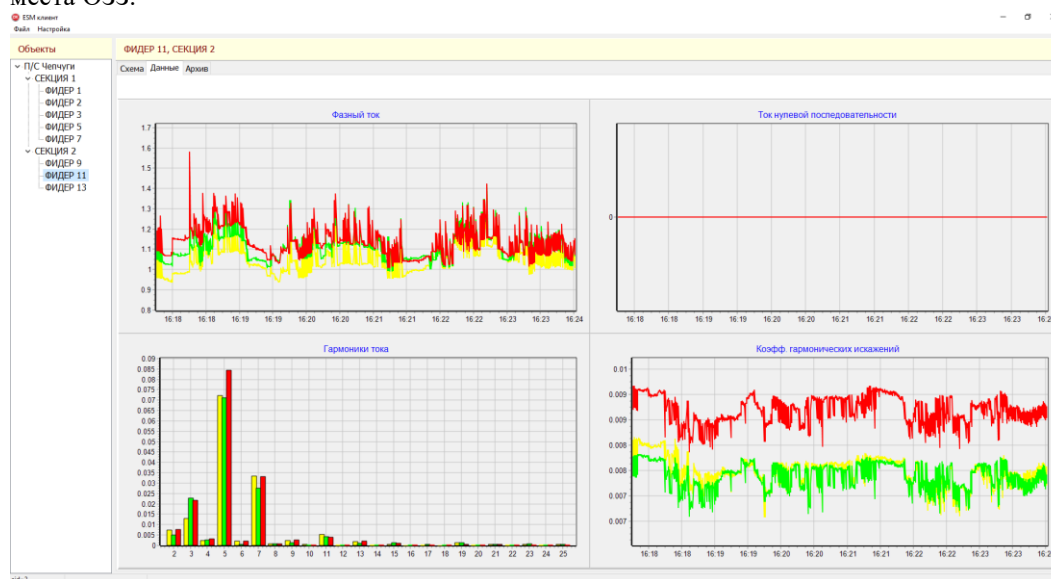


Рис.7. Фотография диалогового окна тока по одиннадцатому фидеру в режиме ОЗЗ через большое сопротивление

Fig.7. Photo of the current dialog box for the eleventh feeder in the OZZ mode through a large resistance

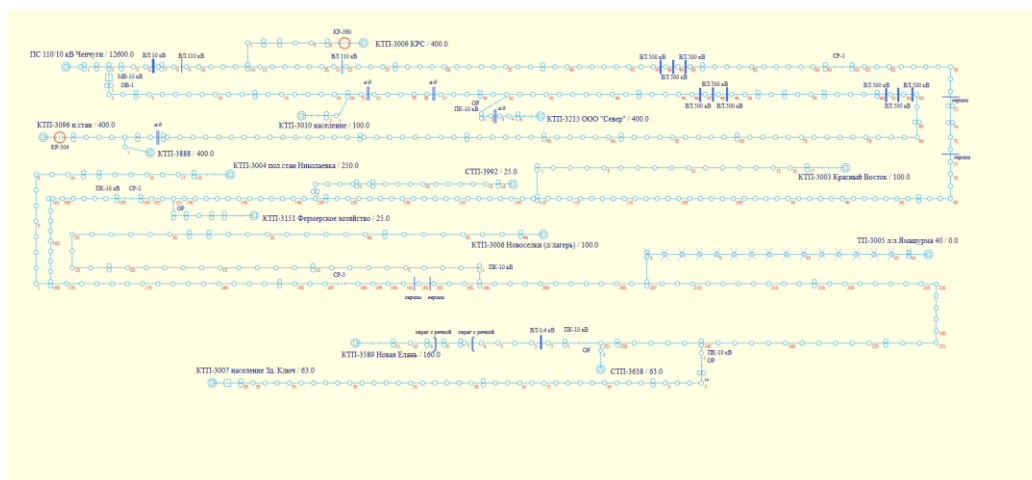


Рис.8 Фотография диалогового окна по опорной схеме отходящего фидера

Fig.8. Photo of the dialog box for the reference scheme of the outgoing feeder

Выводы

1. Результаты эксплуатации цифровой системы мониторинга демонстрируют сложность и не однозначность физических процессов, происходящих при ОЗЗ.
2. Спектральный анализ и осциллограммы токов и напряжений, полученные по результатам эксплуатации, раскрывают невозможность выделения всех типов ОЗЗ только лишь одному выбранному параметру.
3. Практическая эксплуатация показала перспективность подхода на основе анализа ВГ токов и напряжений для различных видов ОЗЗ, в том числе и одного из наиболее сложно диагностируемого вида – кратковременного.
4. Цифровая система мониторинга полностью исключает необходимость пофидерного отключения для определения фидера с повреждением.

Литература

1. Федотов А.И., Ахметвалеева Л.В., Басыров Р.Ш., и др. Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 58-68.
2. Абдуллин Л.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В., и др. Влияние параллельно работающих фидеров на резонансные частоты воздушной линии при однофазном замыкании на землю Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 54-61.
3. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В. Распределение токов и напряжений вдоль воздушных линий электропередачи 6-35 кВ на резонансных частотах при ОЗЗ Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 5-6. С. 69-78.
4. Fedotov A., Abdullazyanov R., Vagapov G., et al. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. В сборнике: 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2016; 57. pp. 7763116
5. Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С. Особенности моделирования определения мест повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ // Промышленная энергетика. 2020. № 3. С. 33-40.
6. Sidorov S., Sukhachev I., Sushkov V. Development of a method for determining the location of a single line-to-ground fault of an overhead power line with voltage of 6(10) kV considering climatic factors // В сборнике: E3S Web of Conferences. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019, SES 2019. 2019. p. 05003
7. Анализ причин обрывов фазных проводов воздушных линий напряжением 6-10 кВ. Хлопова А.В. Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 4 (208). С. 38-43.
8. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 118 с.
9. Сирота И.М. Защита от однофазных замыканий в электрических системах: Киев. Изд. АН УССР. 1955. 208 с.
10. Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ: М.: Энергопрогресс: Энергетик, 2007. 63 с.
11. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения // Новости электротехники. 2005. №6 (36). С. 52-55.
12. Шуин В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ: М.: НТФ «Энергопрогресс». 2001. 104 с.
13. Burkhardt E., Fickert L and Jenau F. The Short-term Compensation Change to Detect Earth Faults in Compensated Networks. 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1-5.
14. Orsáková J., Topolánek D., Toman P., et al. Localization method for the resistive earth faults in compensated network based on simultaneous earth faults evaluation. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, 2014, pp. 1-6.
15. Achleitner G., Obkircher C., Fickert L., et al. An earth fault distance location algorithm in compensated networks with additional estimation of the fault impedance and fault current. 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Parnu, 2008, pp. 193-198,
16. Schmidt U., Frowein K., Druml G., et al. New method for calculation of the harmonics in the residual earth fault current in isolated and compensated networks. 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), Tallinn, 2016, pp. 309-313.
17. Bartholomäus K and Derbel F. Earth Fault Measurement with the Frequency-Selective Earth Fault. 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Hammamet, 2018, pp. 83-87.
18. Wang Z and Wang F. Earth fault detection in distribution network based on wide-area measurement information, 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, 2011, pp. 5855-5859.
19. Burkhardt E., Hilbrich D., Offermann N., et al. The Short-term Isolated Star Point Grounding to Detect Earth Faults in Compensated Networks. The Concept. 2020. 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1-5.
20. Zhang H. A Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, 2017, pp. 1582-1585.

21. Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V. and Kasimov V.A. Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6–10 Kv Distribution Circuits by a Location Method. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 411-415,

22. Kolcunová I., Zbojovský J., Kurimský J. Measurement of corona discharges using uv camera. Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2019. V.10. pp. 251-255.

23. Антонов В.И., Лазарева Н.М., Пуляев В.И. Методы обработки цифровых сигналов энергосистем. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000. 84 с.

24. Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. Энергоатомиздат, 2002. 312 с.

Авторы публикации

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К.Шибанова», Казанский государственный энергетический университет.

Вагапов Георгий Валериянович – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник отдела «НИОКР» Инжиниринговый центр, Казанский государственный энергетический университет.

Абдуллазянов Айнур Фоатович – аспирант кафедры «Электрические станции им. В.К.Шибанова», Казанский государственный энергетический университет.

Шарьянов Ахмет Маратович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедра «Электропривода и электротехники», Казанский национальный исследовательский технологический университета.

References

1. Fedotov AI, Ahmetvaleeva LV, Basyrov RSH. Normirovanie amplitudy vysshih garmonik pri opredelenii fidera s odnofaznym замыканием на землю. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2020;22(1):58-68.

2. Abdullin LI, Vagapov GV, Chernova NV, et al. Vliyaniye parallel'no rabotayushchih fiderov na rezonansnye chastoty vozduшной линии pri odnofaznom замыкании на землю. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2018;20(1-2):54-61.

3. Fedotov AI, Vagapov GV, Chernova NV. Raspredeleniye tokov i napryazhenij vdol' vozduшных линий электропередачи 6-35 kV na rezonansnyh chastotah pri OZZ. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2017;19(5-6):69-78.

4. Fedotov A, Abdullazyanov R, Vagapov G, et al. *Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance*. 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2016;57:7763116.

5. Sidorov SV, Sushkov VV, Suhachev IS. Osobennosti modelirovaniya opredeleniya mest povrezhdeniya vozduшных линий электропередачи napryazheniem 6(10) kV. *Promyshlennaya energetika*. 2020;3:33-40.

6. Sidorov S, Sukhachev I, Sushkov V. *Development of a method for determining the location of a single line-to-ground fault of an overhead power line with voltage of 6(10) kV considering climatic factors*. E3S Web of Conferences. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019, SES 2019. P. 05003

7. Hlopova AV. Analiz prichin obryvov faznyh provodov vozduшных линий napryazheniem 6-10 kV. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2018;4(208):38-43.

8. Vajnshtejn PA, Kolomic NV, SHeStakova VV. *Rezhimy zazemleniya nejtrali v elektricheskikh sistemah*: Tomsk: Izd-vo TPU, 2006. 118 P.

9. Sirota IM. *Zashchita ot odnofaznyh замыканий v elektricheskikh sistemah*. Kiev. Izd. AN USSR. 1955. 208 P.

10. Habad S, Zashchita MA. Ot odnofaznyh замыканий на землю v setyah 6-35 kV: uchebnoye posobie. M.: Energoprogress: *Energetik*. 2007. 63 P.

11. Shalin AI. Zamykaniya na zemlyu v setyah 6-35 kV. Napravlennye zashchity. Osobennosti primeneniya. *Novosti elektrotekhniki*. 2005;6 (36):52-55.

12. SHuin VA, Gusenkov AV. *Zashchity ot замыканий на землю v elektricheskikh setyah 6-10 kV*. M.: NTF «Energoprogress», 2001. 104 P.

13. Burkhardt E, Fickert L and Jenau F. *The Short-term Compensation Change to Detect Earth Faults in Compensated Networks*. 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209841.
14. Orságová J, Topolánek D, Toman P, et al. *Localization method for the resistive earth faults in compensated network based on simultaneous earth faults evaluation*. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2014.0090.
15. Achleitner G, Obkircher L, Fickert M, et al. *An earth fault distance location algorithm in compensated networks with additional estimation of the fault impedance and fault current*. 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Parnu, 2008, pp. 193-198, doi: 10.1109/PQ.2008.4653760.
16. Schmidt U, Frowein K, Druml G. *New method for calculation of the harmonics in the residual earth fault current in isolated and compensated networks*. 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ). Tallinn. 2016. pp. 309-313. doi: 10.1109/PQ.2016.7724132.
17. Bartholomäus K and F. Derbel. *Earth Fault Measurement with the Frequency-Selective Earth Fault*. 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Hammamet. 2018, pp. 83-87. doi: 10.1109/SSD.2018.8570533.
18. Wang Z and F. Wang. *Earth fault detection in distribution network based on wide-area measurement information*. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, 2011. pp. 5855-5859. doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057020.
19. Burkhardt E, Hilbrich D, Offermann N, et al. *The Short-term Isolated Star Point Grounding" to Detect Earth Faults in Compensated Networks*. The Concept, 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209762.
20. Zhang H, et al. *A Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network*. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, 2017, pp. 1582-1585, doi: 10.1109/ICCSEC.2017.8446834.
21. Minullin RG, Piskovatskiy YV and Kasimov VA. *Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6–10 Kv. Distribution Circuits by a Location Method*. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 411-415, doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216267.
22. Kolcunová I, Zbojovský J, Kurimský J. *Measurement of corona discharges using uv camera*. Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2019;10:251-255.
23. Antonov VI, Lazareva NM, Pulyae VI. *Metody obrabotki cifrovyyh signalov energosistem*. M: NTF «Energoprogress», 2000. 84 p.
24. Nagaj VI. *Relejnaya zashchita otvetvitel'nyh podstancij elektricheskikh setej*. Energoatomizdat, 2002. 312 p.

Authors of the publication

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Georgii V. Vagapov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ainur F. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Akhmet M. Sharyapov – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Получено

26 февраля 2021г.

Отредактировано

02 марта 2021г.

Принято

03 марта 2021г.



ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭФФЕКТ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ ОТ АКТУАЛИЗАЦИИ НОРМАТИВОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Ю.И. Солуянов^{1,2,3}, А.Р. Ахметшин^{1,2}, В.И. Солуянов³

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия

³АО «Татэлектромонтаж», г. Казань, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

Резюме: ЦЕЛЬ. Исследование загрузки трансформаторных подстанций 0,4/10кВ, установленных в жилом секторе. Обосновать необходимость актуализации нормативов удельных электрических нагрузок для жилых комплексов. Выполнить расчеты электрической нагрузки жилых комплексов с использованием действующих и актуализированных нормативов с оценкой экономического эффекта. МЕТОДЫ. При выполнении поставленной цели были использованы статистические и экономические методы анализа. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, представлено обоснование необходимости актуализации нормативных значений удельных электрических нагрузок. Выполнен расчет электрической нагрузки по методике Ассоциации «Росэлектромонтаж» как для многоквартирного жилого дома, так и для жилого комплекса в целом. На примере показан экономический эффект от актуализации нормативных значений для г. Санкт-Петербурга. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Значения электрической нагрузки, рассчитанные по методике Ассоциации «Росэлектромонтаж», позволят уменьшить затраты на строительство электрических сетей при возведении жилых комплексов, снизить потери электрической энергии в распределительных электрических сетях 0,4/10кВ, что приведет к удешевлению коммерческой и жилой недвижимости. Республиканские нормативы градостроительного проектирования, в части заявленной мощности, основанной на методике Ассоциации «Росэлектромонтаж», успешно применяются на практике и значительно снизили затраты для строительных компаний Республики Татарстан по выполнению электроснабжения жилых комплексов.

Ключевые слова: удельные расчетные электрические нагрузки, электроснабжение, запертая электрическая мощность, резервная электрическая мощность, проектирование жилых комплексов.

Для цитирования: Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Энерго-ресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 156-166. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-156-166.

ENERGY-RESOURCE-SAVING EFFECT IN THE ELECTRIC SUPPLY SYSTEMS OF RESIDENTIAL COMPLEXES FROM UPDATING THE ELECTRIC LOAD REGULATIONS

YuI. Soluyanov^{1,2,3}, AR. Akhmetshin^{1,2}, VI. Soluyanov³

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia

³JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

Abstract: THE PURPOSE. Study of the load of 0.4 / 10kV transformer substations installed in the residential sector. Justify the need to update the norms of specific electrical loads for residential complexes. Calculate the electrical load of residential complexes using the current

and updated standards with an assessment of the economic effect. **METHODS.** When fulfilling this goal, statistical and economic methods of analysis were used. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, provides a rationale for the need to update the standard values of specific electrical loads. The calculation of the electrical load was carried out according to the methodology of the Association «Roselectromontazh» both for an apartment building and for the residential complex as a whole. The example shows the economic effect of updating the standard values for the city of St. Petersburg. **CONCLUSION.** The values of electrical load, calculated according to the methodology of the Roselectromontazh Association, will reduce the cost of building electrical networks during the construction of residential complexes, reduce electrical energy losses in distribution electrical networks of 0.4/10 kV, which will lead to a reduction in the cost of commercial and residential real estate. Approved in 2019 The republican standards of urban planning, in terms of the declared capacity based on the methodology of the Association «Roselectromontazh» are successfully applied in practice and have significantly reduced the costs for construction companies of the Republic of Tatarstan for the implementation of power supply of residential complexes.

Keywords: specific design electrical loads, power supply, locked electrical power, standby electrical power, design of residential complexes.

For citation: Soluyanov YuI, Akhmetshin AR., Soluyanov VI. Energy-resource-saving effect in the electric supply systems of residential complexes from updating the electric load regulations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):156-166. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-156-166.

Введение и литературный обзор

Для проектирования электрических сетей жилых и общественных зданий используют нормативный документ^{1,2}[1,2,4]. Значения, представленные в документе¹ в части удельных электрических нагрузок, потеряли свою актуальность, так как были рассчитаны в прошлом веке, подразумевая, что электропотребление вырастет на 20-50%. Этого не случилось. Действительно электропотребление населения за последние годы значительно поменялось, так как количество бытовых приборов увеличилось, однако они стали более энергоэффективными, и в результате наблюдается снижение электропотребления.

Построенные в жилом секторе электрические сети, опираясь на нормативные документы, имеют большой запас по сечению и мощности. По данным сетевых компаний существует проблема «запертой мощности», которая заключается в том, что в трансформаторных подстанциях (ТП) вся мощность выбрана, однако по факту нагрузка в максимальном режиме в редких случаях превышает 50% [3,5,7]. Малая нагрузка силовых трансформаторов (СТ) свидетельствует о повышенных потерях в них [6,7].

Предпосылкой к началу исследований в этом направлении стали многочисленные обращения строительных компаний разных регионов страны о незагруженности электрических сетей, так как фактические и расчетные нагрузки отличаются в разы. Поскольку Ассоциация «Росэлектромонтаж» (далее Ассоциация) занимается экспертной деятельностью в области электромонтажного производства, а также разработкой, утверждением и распространением отраслевых нормативно-технических документов, то, начиная с 2016г., совместно с АО «Сетевая компания» и при поддержке президента Республики Татарстан (РТ) Минниханова Рустама Нургалиевича выполнила научно-исследовательскую работу по обновлению расчетных удельных электрических нагрузок. Тем самым впервые в Российской Федерации была приведена корректировка нормативов «для конкретного применения с учетом местных условий» для РТ. После вступления в силу новых нормативов электрических нагрузок застройщики активно начали ими пользоваться для сокращения затрат при строительстве электрических сетей для электроснабжения жилых комплексов.

Появление нормативных документов было связано с программой жилищного строительства. Начиная с 1960 года, ежегодно увеличивалось количество введенного кв.м. жилья. И уже в 1988 г. ввод жилья в СССР составил порядка 125 млн. кв.м [8]. Основой для расчета сетей электроснабжения зданий является расчетная мощность зданий и сооружений. Эти нормы всегда были взаимосвязаны между собой и позволяли

¹ СП256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

² РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей».

вести параллельно подсчет электрических нагрузок объектов застройки (наружные сети электроснабжения) и разработку проектов внутреннего электроснабжения зданий. В таблице 1 представлена история развития нормативных документов.

Таблица 1

История развития нормативных документов			
Нормативный документ	Срок действия	Нормативный документ	Срок действия
СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»	02.03.2017 – н.в.	РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей»	01.01.1995 – н.в.
СП 31-110-2003 «Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий»	01.01.2004-02.03.2017	ВСН 97-83 «Инструкция по проектированию городских, поселковых электрических сетей»	01.07.1983-01.01.1995
ВСН 59-88 «Госкомархитектуры Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования»	01.07.1989-01.01.2004		01.11.1975-01.07.1983
СН 543-82 «Инструкция по проектированию электрооборудования жилых и общественных зданий массового строительства»	01.07.1982-01.07.1989	ВСН 97-75 «Указания по проектированию городских электрических сетей»	01.10.1961-01.11.1975
ВСН 19-74 «Инструкция по проектированию электрооборудования общественных зданий массового строительства»	01.04.1975-01.07.1982		
СН 544-82 «Инструкция по проектированию электрооборудования жилых зданий».	01.07.1982-01.07.1989	СН 167-61 «Указания по проектированию городских электрических сетей»	
СН 297-64 «Указания по проектированию электрооборудования жилых зданий»	01.07.1965-01.07.1982		

Из табл. 1 видно, что периодичность пересмотра нормативных документов составляла 8-10 лет. В них всегда присутствовал резерв на некоторое повышение электропотребления в перспективе 5-10 лет. В современных условиях, когда электрические приборы с каждым годом становятся более энергоэффективными, актуализацию нормативных документов в части расчетных удельных электрических нагрузок необходимо проводить с периодичностью в 5 лет, эта необходимость вызвана снижением затрат при строительстве и эксплуатации электрических сетей [9, 10]. Чем меньше разница между расчетной и фактической нагрузкой, тем больший экономический эффект будет получен. Достоверность полученных значений предлагается обосновать 5 летним мониторингом электрической нагрузки с последующей статистической обработкой. Мониторинг предлагается осуществлять с помощью интеллектуальных систем учета электроэнергии. Благодаря принятому закону³, основной переход на интеллектуальные счетчики должен завершиться к 2023 году.

Своевременная актуализация действующих нормативных документов позволит значительно снизить затраты на строительство электрических сетей, так как планируется: увеличение объема жилищного строительства до 120 млн кв. м в год⁴; создание 8,6 тыс. групп дошкольного образования⁴; создание 230 тыс. новых мест в общеобразовательных организациях⁴.

В пользу мониторинга с последующей актуализацией значений удельных электрических нагрузок потребителей с 5 летней периодичностью приводятся также следующие доводы:

– постоянно улучшается класс энергопотребления бытовой техники до А++ (разница в электропотреблении между классом G и А++ составляет 75%);

³ Федеральный закон от 27.12.2018 N 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации»

⁴ Указ Президента России от 7 мая 2018 года №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»

– с 2023 года показатели удельного расхода электроэнергии в многоквартирных домах должны быть улучшены на 40%, а с 2028 года на 50%⁵, классы энергетической эффективности многоквартирных жилых домов представлены в таблице 2⁶;

– внедрение энергосервисных договоров, предусматривающих осуществление полного комплекса работ по внедрению энергосберегающих решений специализированной энергосервисной компанией, это позволит сократить потребление электрической энергии в бюджетных учреждениях от 40 до 60%.

Таблица 2

Классы энергетической эффективности		
№ п/п	Наименование класса	Величина отклонения значения фактического удельного годового расхода энергетических ресурсов от базового уровня, %
A++	Высочайший	- 60 включительно и менее
A+	Высочайший	от - 50 включительно до - 60
A	Очень высокий	от - 40 включительно до - 50
B	Высокий	от - 30 включительно до - 40
C	Повышенный	от - 15 включительно до - 30
D	Нормальный	от 0 включительно до - 15

Помимо мониторинга анализ параметров, передаваемых от интеллектуальных счетчиков электроэнергии, установленных у потребителей 0,4-10 кВ, позволит:

- своевременно актуализировать коэффициенты спроса и одновременности и несовпадения максимумов [11,12];
- снижение потерь электроэнергии в линиях электропередач и силовых трансформаторах, за счет выявления участков с завышенными потерями электроэнергии [13,14];
- определение источника, ухудшающего качество электроэнергии [15,16];
- определение мест для установки устройств компенсации реактивной мощности [17] и т.д.

Материалы и методы

Построенные кабельные сети и трансформаторные подстанции 0,4/10 кВ по факту оказываются недогруженными [18]. Ассоциация провела исследования загрузки ТП 0,4/10кВ нескольких городов Российской Федерации, рис.1.

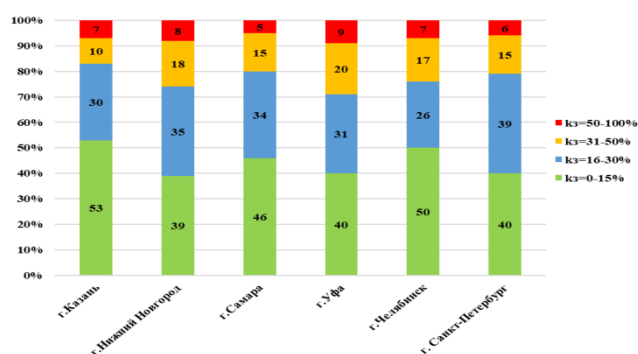


Рис. 1. Количество трансформаторных подстанций 0,4/10 кВ и их коэффициент загрузки
Fig.1. The number of 0.4/10 kV transformer substations and their load factor

Мощность силовых трансформаторов выбирается с учетом 70% суммарной максимальной загрузки в номинальном режиме. По результатам исследований определено, что порядка 75% ТП работают с максимальной загрузкой в течение года

⁵ Приказа Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 17.11.2017 г. № 1550/пр «Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений»

⁶ Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 06.06.2016 N 399/пр «Об утверждении правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов»

менее 30%, что приводит к увеличению потерь и неэффективному использованию инвестиций [2-6].

С 2012 г. по 2016 г. в стране ежегодный темп прироста конечного потребления электроэнергии 0,3%. Однако введенные в те же годы мощности сетевой инфраструктуры способны покрыть нагрузку потребителей на 86 ГВт. Фактическая неиспользуемая мощность (“запертая”) при этом составила 73,1-75,68 ГВт [19].

Для решения сложившейся ситуации в жилом строительстве РТ Ассоциация по заказу АО «Сетевая компания» выполнила работу, результатом которой стало внесение изменений в 2019 г. в Постановление Кабинета Министров РТ⁷ в части заявленной мощности жилых зданий. В результате застройщики РТ снизили стоимость и сроки строительства электрических сетей для электроснабжения жилых зданий. На ежегодном Татарстанском международном форуме по энергоресурсоэффективности и экологии в 2020г. выполненная работа получила Гран-при в номинации: «Энерго-эффективные технологии и оборудование» - оборудование и технологии, позволяющие при их внедрении снизить эксплуатационные затраты использования топливно-энергетических ресурсов и материалов и (или) уменьшить вредное влияние на окружающую среду в течение жизненного цикла».

В Казанском государственном энергетическом университете 11 февраля 2020 г. состоялось выездное заседание Комитета Государственного Совета РТ по жилищной политике и инфраструктурному развитию на тему: «О мерах по повышению энергоэффективности в сфере ЖКХ. Проблемы и пути совершенствования законодательства, в том числе в части предоставления населению коммунальной услуги по горячему водоснабжению», на котором было рекомендовано Кабинету Министров РТ: «Рассмотреть вопрос внесения изменений в постановление⁵ в части дополнения следующим разделом «Расчет заявленной мощности на технологическое присоединение энергопринимающих устройств общественных зданий - детские сады, общеобразовательные школы»».

На сегодняшний день подготовлен проект изменений для актуализации электрических нагрузок дошкольных общеобразовательных и среднеобразовательных учреждений. Совокупный ожидаемый экономический эффект для РТ составит более 1 млрд. руб. в год при сохранении объемов строительства.

Экономический эффект от актуализации нормативных значений удельных электрических нагрузок могут получить все регионы страны. Структура потребления электрической энергии, состав жилого фонда в различных регионах страны и годовой душевой расход электроэнергии в быту значительно отличаются, что свидетельствует о необходимости разработки нормативных значений удельных электрических нагрузок с учетом региональных особенностей.

В качестве примера был рассмотрен один из жилых комплексов г. Санкт-Петербурга, со следующими характеристиками: 223 тыс. кв.м. квартир, два детских сада на 440 мест; среднеобразовательная школа на 1375 мест. Замеры максимальной зафиксированной мощности ТП 0,4/10кВ представлены на рис. 2.

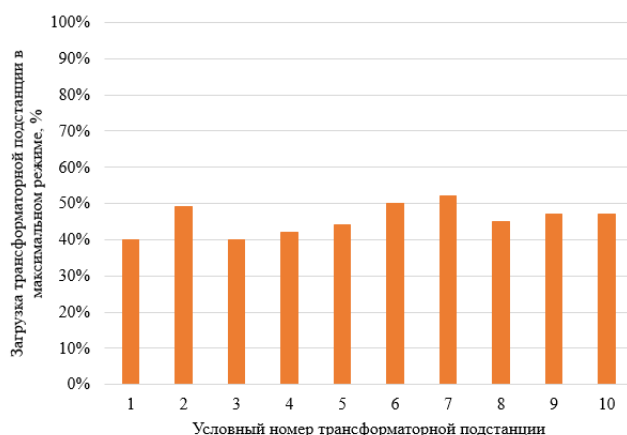


Рис. 2. Максимальная зафиксированная мощность трансформаторных подстанций 0,4/10кВ, установленных в жилом комплексе.

Fig.2. Maximum fixed capacity of 0.4/10 kV transformer substations installed in a residential

⁷ Постановление Кабинета Министров Республики Татарстан от 27.12.2013 № 1071 «Об утверждении республиканских нормативов градостроительного проектирования Республики Татарстан»

complex

Рис. 2 демонстрирует малую загрузку ТП даже в часы максимума, которые в жилом секторе длятся 1-2 часа в сутки, что подтверждается типовыми профилями нагрузок многоквартирных домов (МКД), представленными на рис. 3., свидетельствуя об актуальности решаемой проблемы.

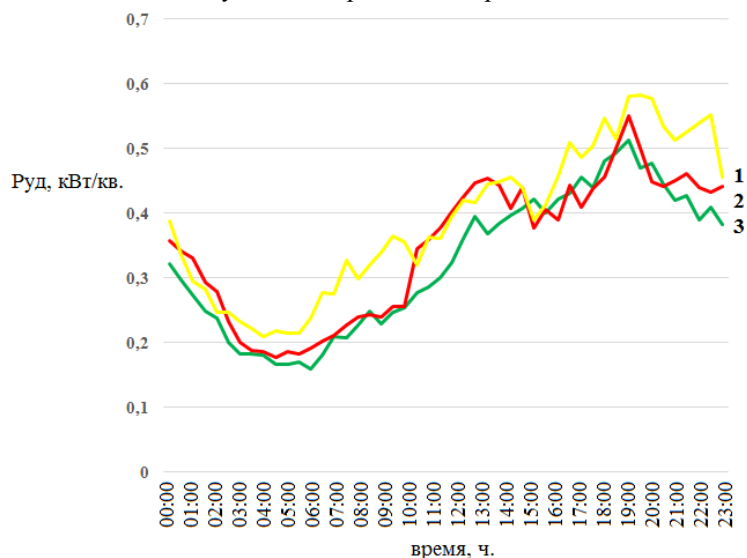


Рис. 3 Типовой профиль нагрузки МКД (1- МКД-105кв.; 2 - МКД - 80кв.; 3 - МКД - 248кв.).

Fig.3. Typical MK load profile (1-MK-105 sq. m.; 2-MKD-80 sq. m.; 3-MK-248 sq. m.)

Сравним расчет электрической нагрузки по методике Ассоциации и полученные технологические условия для двух 12 эт. МКД с электрическими плитами, рис. 4.



а



б

Рис. 4. Многоквартирный дом (а – на 1200 кв., б – 2800 кв.)

Fig.4. Apartment building (a-1200 sq. m., b-2800 sq. m.)

Результаты расчетов:

– МКД с количеством кв.: 1200 шт.

С использованием методики ассоциации: $P_{\text{ЗМ}} = P_{\text{ЗМ.уд}} \cdot n_{\text{ЗМ}} = 0,81 \cdot 1200 = 972 \text{ кВт}$

Полученные технические условия (ТУ) на 1900 кВт

Экономия составит 928 кВт

– МКД с количеством кв.: 2 800 шт.

С использованием методики ассоциации: $P_{\text{ЗМ}} = P_{\text{ЗМ.уд}} \cdot n_{\text{ЗМ}} = 0,81 \cdot 2800 = 2\,268 \text{ кВт}$

Полученные ТУ на 4 648 кВт

Экономия составит 2 380кВт

Как показывают расчеты, заявленную мощность можно снизить практически в 2 раза, если выполнить актуализацию нормативных значений в части удельных электрических нагрузок.

Результаты

Для определения экономического эффекта от актуализации электрических нагрузок для жилого комплекса г. Санкт-Петербурга был выполнен расчет, результаты которого представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчетов			
Наименование	По проекту, выполненному на основании свода правил ¹	По методике Ассоциации	Разница
1. Мощность и стоимость технологического присоединения (ТП)	12 000кВт 10 742 400руб.	6 352 кВт 5 686 310руб.	5 648кВт 5 056 089 руб.
1.1. Мощность и стоимость ТП (жилье)	9 067,12кВт 8 116 885руб.	4 933,41 кВт 4 416 388руб.	4 133,71кВт 3 700 497 руб.
2. Количество и мощность силовых трансформаторов	7хТП, 14хТМ-1600 (22 400кВт) 143 150 000руб.	7хТП, 14хТМ-1000 (14 000кВт) 101 500 000руб.	8 400кВт 41 650 000руб.
3. Кабельные линии (КЛ) 0,4 кВ (сечение и протяженность)	4х185мм ² -12512м 4х240мм ² -46475м 92 775 663руб.	4х185мм ² -8523м 4х240мм ² -31601м 63 102 982руб.	4х185мм ² - 3989м 4х240мм ² - 14874м 29 672 681руб.
3.1. КЛ 10 кВ	Без изменений		
Экономический эффект			76 378 770руб. 223 316 м.кв. жилья

Экономический эффект от актуализации нормативных значений в части электрических нагрузок для рассматриваемого жилого комплекса составит ориентировочно 76 378 770 руб., рис. 5, в том числе за счет:

1. Снижения мощности технологического присоединения – 5648 кВт (5 056 089 руб.)
2. Снижение мощности силовых трансформаторов – 14 000кВт (41 650 000руб.)
3. Уменьшение длины КЛ за счет уменьшения расчетной нагрузки – 18 863 м (29 672 681руб.)

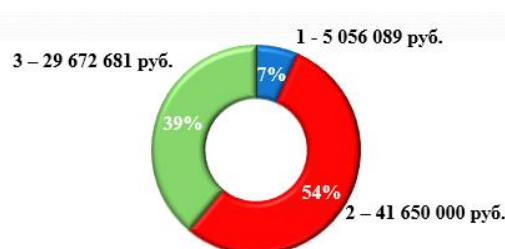


Рис. 5. Экономический эффект от актуализации нормативных значений.

Fig.5. The economic effect of updating the standard values.

Обсуждение

В соответствии с прогнозом социально-экономического развития г. Санкт-Петербурга на период до 2035 года, утвержденным постановлением⁸, среднегодовой объем

⁸ Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 14.02.2017 N 90 (ред. от 20.01.2020) «О прогнозе социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 года»

ввода жилых домов в период 2020-2024 гг. составит 3 080 тыс.кв.м. На рис. 6 приведен прогноз ввода в эксплуатацию жилья по районам г. Санкт-Петербурга в период 2020-2024 гг. и соответствующий прирост потребления электрической мощности для обеспечения электроснабжения вводимого объема жилья.

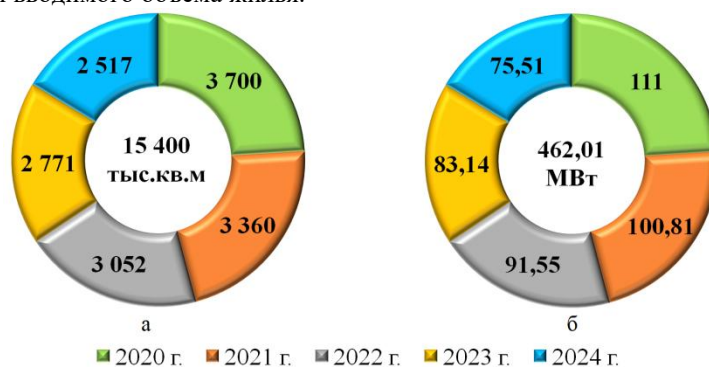


Рис. 6. Прогноз ввода в эксплуатацию жилых домов (а) и потребности в электрической мощности (б) г. Санкт-Петербурга на период 2020-2024 гг.

Fig 6. Forecast of commissioning of residential buildings (a) and demand for electric power (b) in St. Petersburg for the period 2020-2024.

После актуализации нормативных значений удельной электрической нагрузки в г. Санкт-Петербурге возможно снизить потребность в электрической мощности для строительства жилья на 185-231 МВт.

Из отчета ПАО «Ленэнерго» показатель степени загрузки трансформаторной подстанции за 2019 г. составил 24,6%, за 2018 г. - 26,0%. Потери электроэнергии в электрических сетях г. Санкт-Петербурга в 2019г. составили 2 652 млн. кВт*ч (7 183 млн. руб.). Ориентировочное снижение потерь электроэнергии в силовых трансформаторах за счет увеличения загрузки не перегруженных может составить 15% (1,1 млрд. руб.) от общего количества потерь электроэнергии.

Выводы

1. Утвержденные в РТ новые нормативные значения удельной электрической нагрузки жилых зданий применяются на практике, и застройщики снизили стоимость и сроки строительства электрических сетей для электроснабжения жилых зданий.

2. Ежегодный ожидаемый экономический эффект при сохранении существующих темпов строительства для г. Санкт-Петербурга от внедрения актуализированных значений удельной расчетной электрической нагрузки составит более 2 млрд. руб. в год с учетом уменьшения потерь электроэнергии.

3. Должен осуществляться мониторинг электрических нагрузок по регионам (группам регионов) и по климатическим зонам с целью своевременной корректировки нормативных значений удельных электрических нагрузок, которая должна проводиться как минимум каждые 5 лет. Этот период позволит своевременно реагировать на разницу между расчетной и фактической электрическими нагрузками потребителей.

4. Для осуществления мониторинга электрической нагрузки создаются все условия, в том числе возможность дистанционного снятия показаний с интеллектуальных электрических счетчиков.

Литература

- Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. Москва: ИД «ФОРУМ» ИНФРА-М. 2017. 416 с.
- Надтока И.И., Павлов А.В. Повышение точности расчета электрических нагрузок многоквартирных домов с электроплитами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. №2. С. 45-48.
- Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., и др. Актуализация расчетных электрических нагрузок с последующим практическим применением на примере Республики Татарстан, Промышленная энергетика. 2021. №2. С.32-40.

4. Надтока И.И., Павлов А.В. Расчеты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // Известия вузов. Электромеханика. 2014. №3. С. 36-39.
5. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Солуянов Д.Ю., и др. Актуализация электрических нагрузок многоквартирных жилых домов, Вестник Чувашского университета, 2020. №1. С. 5-15.
6. Надтока И.И., Павлов А.В., Новиков С.И. Проблемы расчета электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов // Известия вузов. Электромеханика. 2013. №1. С. 136-139.
7. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., и др. Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях на основе анализа их фактических нагрузок, Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 5 (62). С. 68-73.
8. Массовое домостроение в России: история, критика, перспективы Издание осуществлено по заказу Комитета по архитектуре и градостроительству Москвы (Москомархитектура) Отпечатано в типографии «АВТ Групп» Москва, 2016 248 с.
9. Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Soluyanov D.Y., et al. Experimental research of electrical loads in residential and public buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. V. 860.
10. Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Khalturin V.A., Monitoring and updating of specific electric loads of residential and public buildings, Journal of Physics: Conference Series, 2020.V. 1683.
11. Albert A., Rajagopal R. Smart meter driven segmentation: what your consumption says about you // IEEE Trans. Power Syst. 2013.V. 28, iss. 4, 2013, INSPEC Accession Number: 13849579.pp. 4019-4030.
12. Ledva G.S., Mathieu J.L., Separating Feeder Demand into Components Using Substation, Feeder, and Smart Meter Measurements // IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, iss. 4, 2020, Accession Number: 19710011, pp.3280-3290 INSPEC
13. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W. S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, Alberto Leon-Garcia, Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid // IEEE Transactions on Smart Grid. 2013.V. 1, № 3, INSPEC Accession Number: 11655620, pp. 320-331.
14. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Мероприятия по увеличению пропускной способности линий электропередач в распределительных сетях 10 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 5-6. С. 79-85.
15. Paula Carroll, Tadhg Murphy, Michale Hanley, Daniel Dempsey, John Dunne, Household Classification Using Smart Meter Data // Journal of official statisticsvol. 2018. V. 34 N.1. pp. 1-25.
16. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Абдрахманов Р.С. Обеспечение нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4-10 кв с помощью вольтодобавочных трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 9-10. С. 40-45.
17. Зарипова С.Н., Чернова Н.В., Ахметшин А.Р. Глубокая компенсация реактивной мощности в распределительных электрических сетях напряжением 0,4-10кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 1-2. С. 60-66.
18. Антонов Н. В., Евдокимов М. Ю., Чичеров Е. А. Проблемы в оценке региональной дифференциации потребления электроэнергии в бытовом секторе России // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2019. № 4. С. 53–71.
19. Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Ahmetshin A.R., Calculation of electrical loads of residential and public buildings based on actual data, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. V. 643.

Авторы публикации

Солуянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, почетный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент Ассоциации «Росэлектромонтаж», председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж».

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет, ведущий специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж».

Солуянов Владимир Иванович – главный инженер КМУ-2, АО «Татэлектромонтаж».

References

1. Opoleva GN. *Power supply for industrial enterprises and cities*. Moscow: Publishing House FORUM INFRA-M, 2017. 416 p.
2. Nadtoke II, Pavlov AV. Increasing the accuracy of calculating the electrical loads of apartment buildings with electric stoves. *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical science*. 2015;2:45-48.
3. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin A.R., et al. *Industrial power engineering*. 2021;2:32-40. doi: 10.34831 / EP.2021.15.61.005.
4. Nadtoke II, Pavlov AV. Calculations of electrical loads in the residential part of apartment buildings with electric stoves based on the average loads of apartments. *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 2014;3:36-39.
5. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Soluyanov D.Yu., et al. Actualization of electrical loads in apartment buildings. *Bulletin of the Chuvash University*. 2020;1:5-15.
6. Nadtoke I.I., Pavlov AV, Novikov SI. Problems of calculating electrical loads of municipal consumers in micro-districts of megapolises. *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 2013;1:136-139.
7. Soluyanov YI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Energy-saving solutions in distribution electrical networks based on the analysis of their actual loads, *Electricity. Transmission and distribution*, 2020;5(62):68-73.
8. *Mass housing construction in Russia: history, criticism, prospects*. The publication was commissioned by the Committee for Architecture and Urban Planning of Moscow (Moskomarkhitektura) Printed in the printing house «AVT Group» Moscow, 2016 248 p.
9. Soluyanov YI, Fedotov AI, Soluyanov DY, et al. *Experimental research of electrical loads in residential and public buildings*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020;860. doi: 10.1088 / 1757-899X / 860/1/012026.
10. Soluyanov YI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Monitoring and updating of specific electric loads of residential and public buildings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;168. doi: 10.1088 / 1742-6596 / 1683/5/052032.
11. Albert A, Rajagopal R. Smart meter driven segmentation: what your consumption says about you. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013;28(4). INSPEC Accession Number: 13849579. 2013;28(44019-4030). doi: 10.1109 / TPWRS.2013.2266122.
12. Ledva GS, Mathieu JL. *Separating Feeder Demand into Components Using Substation, Feeder, and Smart Meter Measurements*. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020;11:4. Accession Number: 19710011, pp.3280-3290 INSPEC. doi: 10.1109 / TSG.2020.2967220.
13. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent WS Wong, Juri Jatskevich. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020;1(3). INSPEC Accession Number: 11655620. 2020;1(3):320-331, doi: 10.1109 / TSG.2010.2089069.
14. Fedotov AI, Akhmetshin AR. Measures to increase the capacity of power lines in distribution networks of 10 Kv. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2011;5-6:79-85.
15. Paula Carroll, Tadhg Murphy, Michale Hanley. Household Classification Using Smart Meter Data. *Journal of official statistics*. 2018;34(1):1-25. doi: 10.1515 / jos-2018-0001.
16. Fedotov AI, Akhmetshin AR, Abdrakhmanov RS. Ensuring the standard voltage level in distribution networks of 0.4-10 kV using booster transformers. *Izvestiya vysshikh educational institutions. Energy problems*. 2011;9-10:40-45.
17. Zaripova SN, Chernova NV, Akhmetshin AR. Deep compensation of reactive power in distribution electrical networks with a voltage of 0.4-10 kV. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2014;1-2:60-66.
18. Antonov NV, Evdokimov MYu, Chicherov EA. Problems in assessing regional differentiation of electricity consumption in the household sector of Russia. *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*. 2019;4:53-71. doi: 10.18384 / 2310-7189-2019-4-53-71.

19. Soluyanov YI, Fedotov AI, Ahmetshin AR. *Calculation of electrical loads of residential and public buildings based on actual data*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019;643, doi: 10.1088 / 1757-899X / 643/1/012051.

Authors of the publication

Yuri I. Soluyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vladimir I. Soluyanov – JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia.

Получено

04 февраля 2021г.

Отредактировано

11 февраля 2021г.

Принято

19 февраля 2021г.



ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Т.В. Синюкова¹, В.Н. Мещеряков¹, А.В. Синюков¹

¹Липецкий государственный технический университет,
г. Липецк, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, mesherek@yandex.ru, zeitsn@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследовать существующие способы частотного управления и их влияния на характеристики асинхронного двигателя, в том числе и на энергетические параметры. Рассмотреть новые схемные решения исследуемого типа управления. Составить математическую модель каждого из способов частотного управления. Произвести анализ полученных результатов с позиций формирования механических, электромеханических и энергетических составляющих. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся метод компьютерного имитационного моделирования, реализованный средствами Matlab Simulink. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье рассмотрены этапы становления систем управления, с анализом их достоинств и недостатков. Произведено моделирование актуальных на текущий момент систем управления асинхронным двигателем, рассмотрены новые схемные решения. Произведен анализ полученных механических, электромеханических и энергетических характеристик. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Проведенные исследования имеют практическую направленность, так как имитационное моделирование позволяет получить характеристики объекта без дополнительных вложений на его реконструкцию. Выявить оптимальную для данного механизма систему управления в зависимости от предъявляемых к объекту требований. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования на реальных объектах схем с трансформатором в цепи ротора, хорошие показатели по демпфированию колебаний в многодвигательных системах также выявлены у схем данного типа.

Ключевые слова: Система управления, электропривод, моделирование, асинхронный двигатель, Matlab.

Для цитирования: Синюкова Т.В., Мещеряков В.Н., Синюков А.В. Исследование систем управления для подъемно-транспортных механизмов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 167-181. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-167-181.

RESEARCH OF FREQUENCY CONTROL SYSTEMS FOR LIFTING AND TRANSPORT MECHANISMS

TV. Sinyukova¹, VN. Meshcheryakov¹, AV. Sinyukov¹

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, mesherek@yandex.ru, zeitsn@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To investigate the existing methods of frequency control and their influence on the characteristics of the asynchronous motor, including the energy parameters. Consider new circuit solutions of the control type under study. Create a mathematical model of each of the methods of frequency control. To analyze the results obtained from the point of view of the behavior of mechanical, electromechanical and energy components. *METHODS.* When solving this problem, the method of computer simulation modeling, implemented by means of Matlab Simulink, was used. *RESULTS.* In this paper, various aspects of electric drive systems based on asynchronous motors with the use of cascade switching are studied and described, existing connection schemes for such systems are analyzed, and several new options with improved characteristics are proposed. A comparative analysis of various connection schemes is made, the most interesting results of such analysis are presented, and conclusions

are drawn about the future prospects of certain circuit solutions. Electric drive systems were modeled in the Simulink MATLAB environment using software tools to demonstrate the operation parameters of the considered circuits. CONCLUSION. Various schemes for switching on the asynchronous motor in the Simulink Matlab environment were investigated. The results of the study revealed the potential usefulness of using a circuit with a transformer in the rotor circuit, as well as the construction of a multi-motor electric drive with a common transformer and a common frequency converter circuit. The efficiency of parallel connection of rotary circuits of a two-motor electric drive was demonstrated. The methods of returning the sliding energy to the network are also compared, and their effectiveness in a comparative analysis with the operation in the closed-loop rotor mode is demonstrated.

Keywords: Control system, electric drive, simulation, asynchronous motor, Matlab.

For citation: Sinyukova TV, Meshcheryakov VN, Sinyukov AV. Research of frequency control systems for lifting and transport mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1): 167-181. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-167-181.

Введение

Большинство предприятий разного профиля ставят перед собой задачу экономичного использования электроэнергии.

Асинхронные двигатели заняли прочные позиции во многих отраслях промышленности, составив значительный класс потребителей электрической энергии [1-4].

Данный вид двигателей выпускается в следующем исполнении – с короткозамкнутым ротором и фазным ротором. Весомым недостатком асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, в системах без частотного преобразователя, является большой пусковой ток. Системы такого типа не приемлемы для подъемно-транспортных механизмов, требующих изменения скоростных параметров при пуске и остановке двигателя [5, 6].

Использование асинхронных двигателей с фазным ротором на промышленных объектах позволяет осуществлять регулировку частоты вращения двигателя, за счет применяемого в системах данного типа инструментария, в виде пускорегулирующего реостата вводимого в цепь ротора или реактора, что приводит к снижению пусковых токов, оказывает влияние на параметры момента и вид механической характеристики.

В работе поставлена цель, которая заключается в исследовании способов частотного управления и их влияния на характеристики двигателя, в том числе и на энергетические параметры.

Наиболее часто используемой методикой изменения скорости вращения двигателя является метод, основанный на изменении показателей частоты питания. Востребованность данного способа напрямую связана с достижениями в области вентильных преобразователей. К недостаткам данного решения можно отнести присутствие в выходных параметрах тока с преобразователя частоты несинусоидальности, что негативно влияет на работу двигателя, снижая сроки его эксплуатации, также отрицательными составляющими являются – увеличение размеров и стоимости устройства.

Следующий способ управления частотой вращения основан на регулировании показателей скольжения, данный процесс становится осуществимым за счет присутствия в цепи ротора сопротивления, параметры которого можно изменять. У данного метода также есть достоинства и недостатки. К достоинствам можно отнести простоту конструкции, для реализации не требуется больших финансовых вложений, существенным недостатком являются большие потери энергии на пусковых резисторах, а также необходимость постоянного контроля их состояния с привлечением обслуживающего персонала.

На многих промышленных объектах регулирование скорости до сих пор осуществляется энергозатратным способом посредством ввода или вывода сопротивлений в цепи ротора. Релейно-контакторные схемы благодаря простоте конструкции входящих в ее состав аппаратов, их ремонтнопригодности, отсутствию высокой чувствительности к электромагнитным полям, к температурным перепадам, способностью работать в помещениях с повышенным уровнем пыли до сих пор занимают прочные позиции на промышленных предприятиях. Требования к системам управления постоянно

повышаются, что ведет к поиску новых решений. Снижение потерь энергии можно обеспечить за счет перехода на вентильный управляемый электрический привод. Использование данного решения приведет к энергоэффективности, увеличению диапазона регулирования скорости, повысит качество переходного процесса, позволит осуществлять рекуперацию энергии в сеть, повысит робастность и надежность системы в целом, в том числе увеличит срок службы механических узлов подъемно-транспортных механизмов. В среднем, при использовании данного решения, потребление электрической энергии снижается на 20-30 процентов.

Улучшение показателей регулирования скорости и ее диапазона дает использование импульсно-ключевого управления [7-15].

Для исследования в данной работе взят двигатель с мощностью 30 кВт. Параметры для моделирования систем управления были рассчитаны на основе метода, базирующегося на данных электродвигателя, взятых из каталогов. При моделировании использовалась модель асинхронного двигателя с фазным ротором работающего в режиме короткозамкнутого ротора

Схемные решения со скалярной системой управления

Первой исследуемой в среде *Matlab Simulink* системой стала система управления асинхронным двигателем с асинхронно-вентильным каскадом, которая позволяет осуществлять возврат энергии в цепь постоянного тока преобразователя (рис. 1). Питание на выпрямитель поступает от источника напряжения. Имеющийся в схеме конденсатор играет роль накопителя энергии поступающей из сети, также в его задачи входит снижение периодически возникающих повышенных показателей постоянного напряжения. В схему введен датчик, контролирующий показатели тока, сигнал с него сравнивается с уставкой регулятора и далее поступает в виде управляющего сигнала на IGBT-транзистор, при закрытом состоянии транзистора диод пропускает ток из цепи ротора. В модели реализован запуск двигателя без нагрузки на валу, регулирование частоты напряжения не предусмотрено.

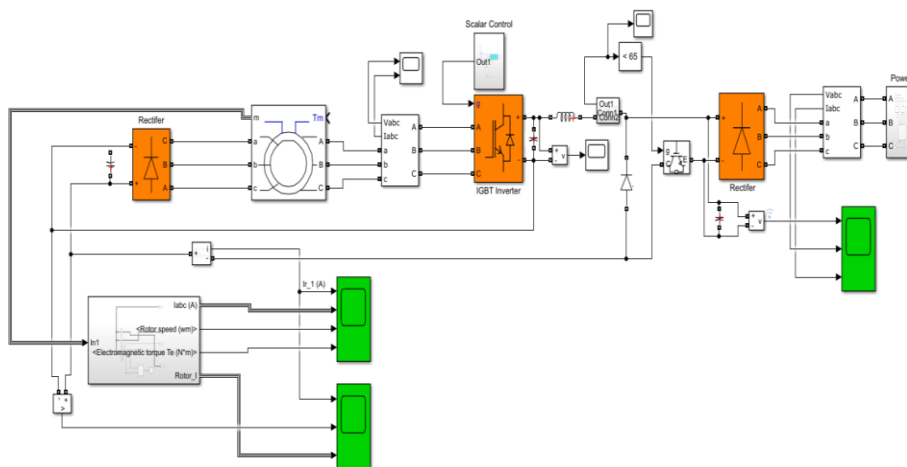


Рис. 1. Модель I
Fig.1. Model 1

На рис. 2 и 3 представлены полученные в результате моделирования характеристики, анализ которых позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемое схемное решение является недорогой альтернативой при модернизации в случае использования на реальном объекте прямого или реакторного пуска.

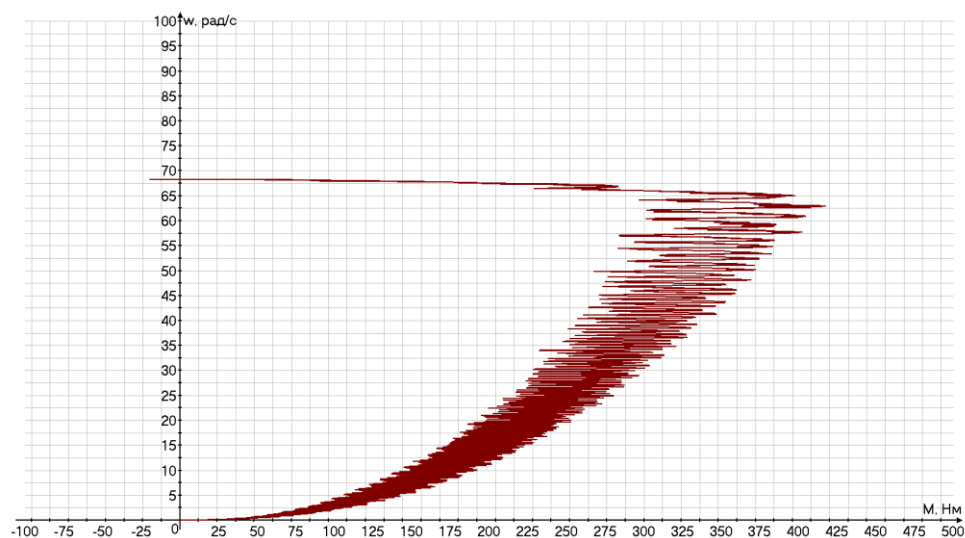


Рис. 2. Зависимость скорости от момента
Fig.2. Dependence of the speed on the moment

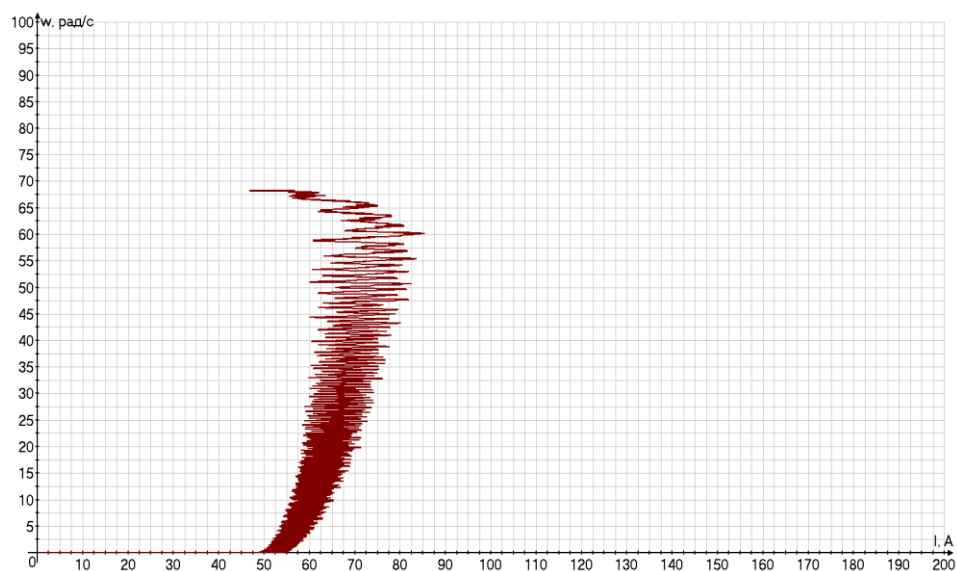


Рис. 3 Зависимость скорости от величины тока
Fig.3. Dependence of the speed on the current value

Характеристика крутящего момента не имеет переменных по знаку колебаний, его нарастание происходит плавно. Использование данной системы управления приводит к снижению токовой нагрузки на двигатель, так как показатели тока статора имеют не сильный скачок при пуске, составляющий 1,2 от тока номинального.

Система управления с асинхронно-вентильным каскадом на базе автономного инвертора тока, в которой возможно изменение частоты подаваемого на статор напряжения представлена на рис. 4.

В данной схеме реализован скользящий тип управления с обратной связью по скорости с изменением частоты в период пуска двигателя. Частота меняется по закону, обеспечивающему режим эффективного скольжения, при котором энергия возвращается в цепь постоянного тока.

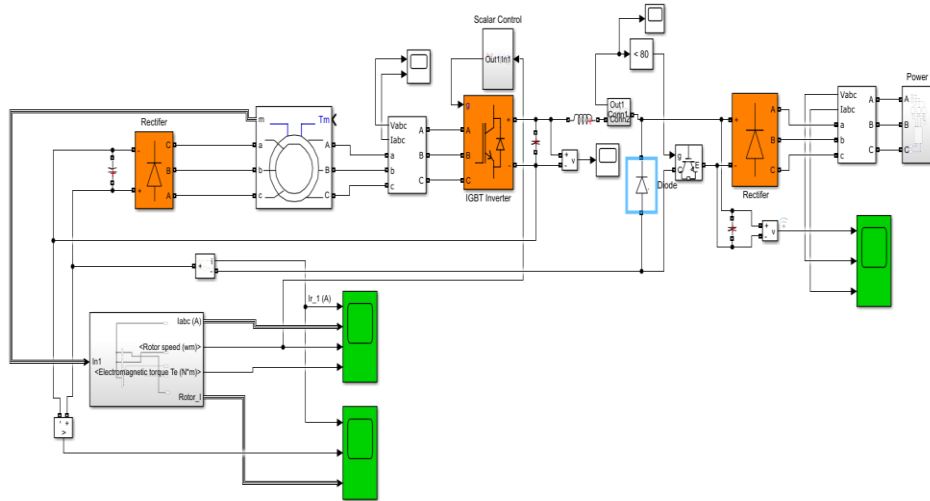


Рис. 4. Модель II
Fig.4.Model 2

Полученные в результате имитационного моделирования в среде Matlab Simulink характеристики приведены на рис. 5 и 6. На представленном переходном процессе можно увидеть присутствие бросков крутящего момента, переменных по знаку скачков момента не наблюдается, процесс разгона происходит при номинальном значении момента. Пусковой ток превышает значение номинального тока примерно на 50 процентов.

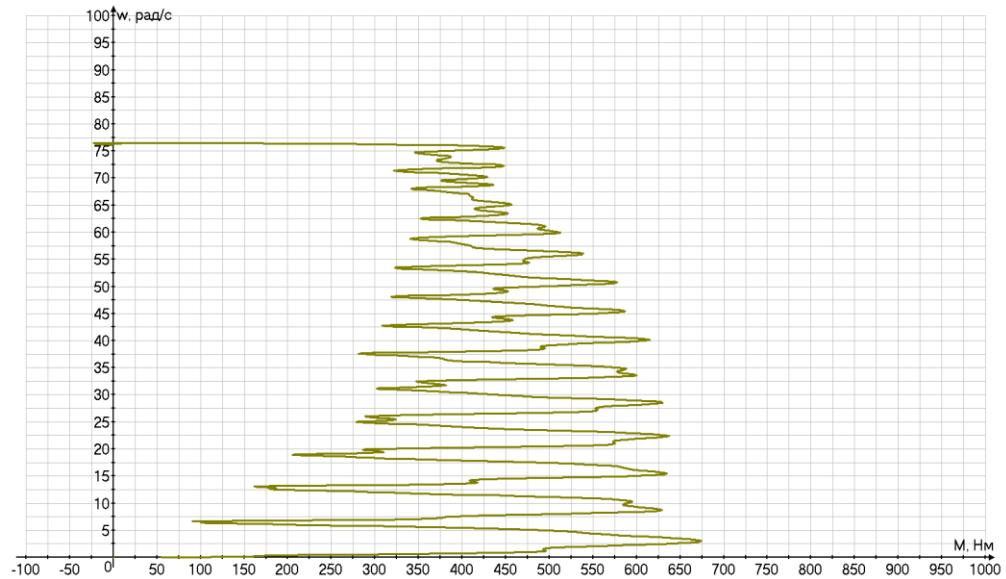


Рис. 5. Зависимость скорости от момента
Fig.5. Dependence of the speed on the moment

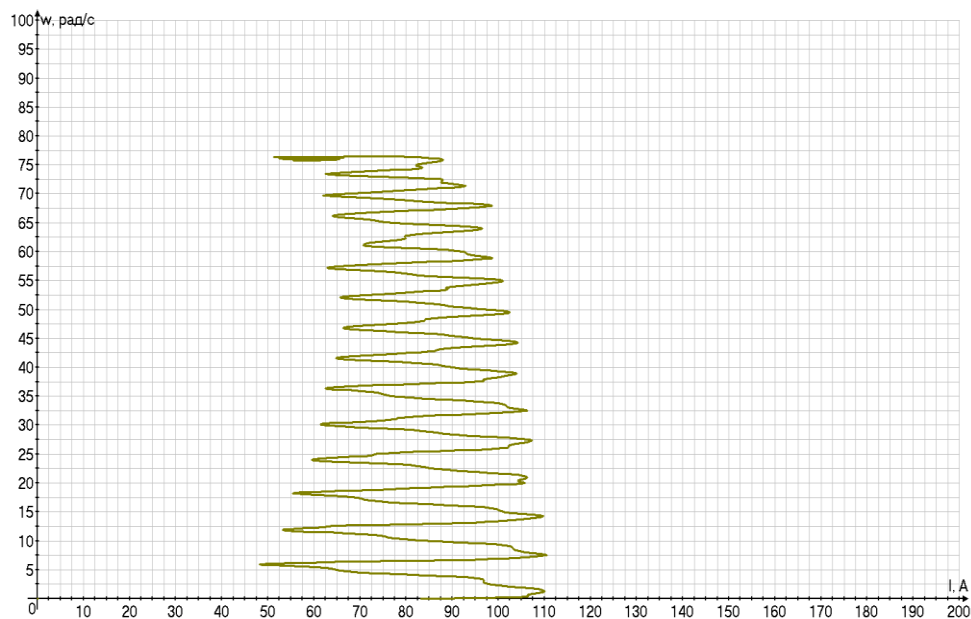


Рис. 6. Зависимость скорости от величины тока
Fig.6. Dependence of the speed on the current value

На рис. 7 показан переходный процесс потребляемой двигателем мощности, данные получены при работе двигателя с номинальной нагрузкой.

Схемные решения с векторной системой управления

На следующем этапе рассмотрены схемные решения с векторной системой управления. Система содержит релейный регулятор тока статора, реализация емкостного фильтра, подключенного в параллельную с обмоткой статора цепь, осуществлена посредством конденсаторов соединенных в звезду (рис. 8). Схема выполнена на базе автономного инвертора напряжения.

На рис. 9 и 10 представлены характеристики полученные при моделировании рассматриваемой системы. В результате анализа характеристик было выявлено, что значение пускового тока превышает номинальный ток в 2 раза, но данное значение быстро снижается до номинального параметра. Переходный процесс является «мягко» протекающим, влияние на электрический двигатель пускового тока не значительное. По характеристике зависимости скорости от момента видно, что переходный процесс представляет из себя стандартный частотный пуск. Максимальный момент равен значению момента номинального.

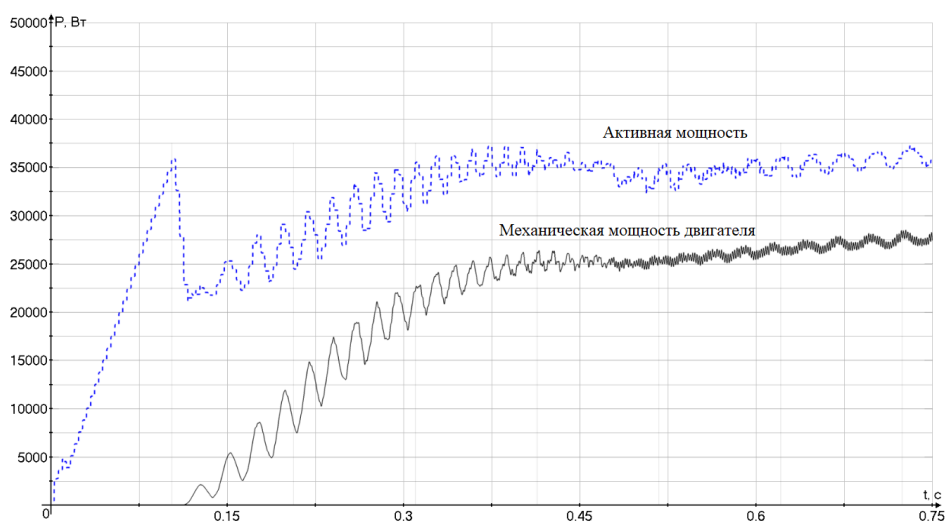


Рис. 7. Зависимость мощности от времени
Fig.7. Power versus time dependence

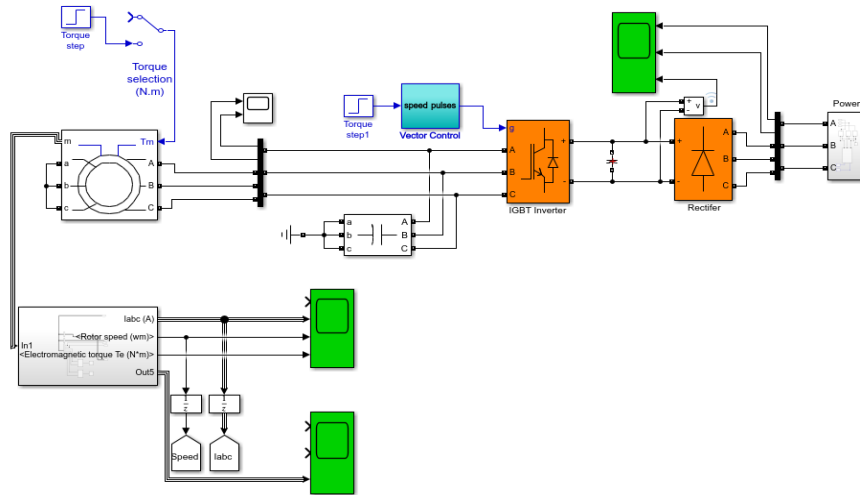


Рис. 8. Модель III

Fig.8. Model.3

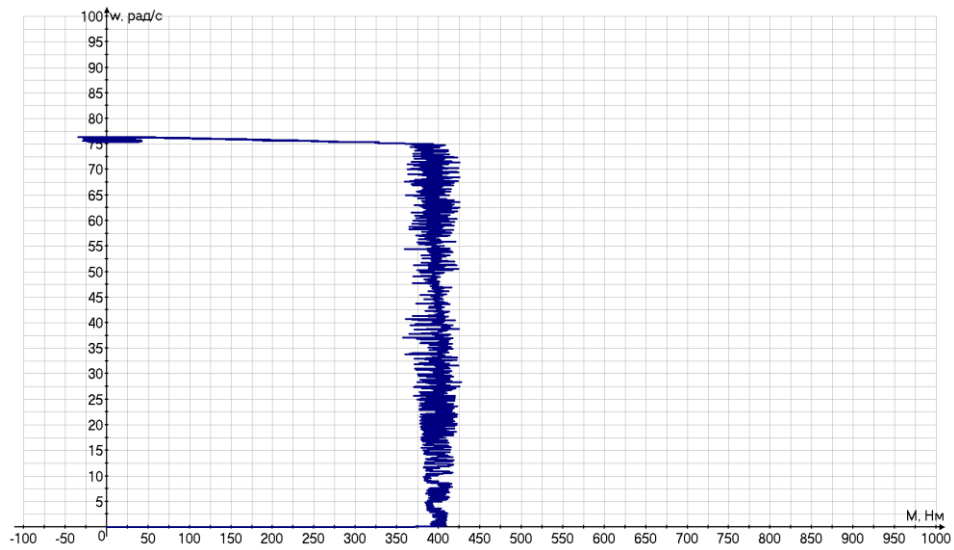


Рис. 9. Зависимость скорости от момента

Fig.9. Dependence of the speed on the moment

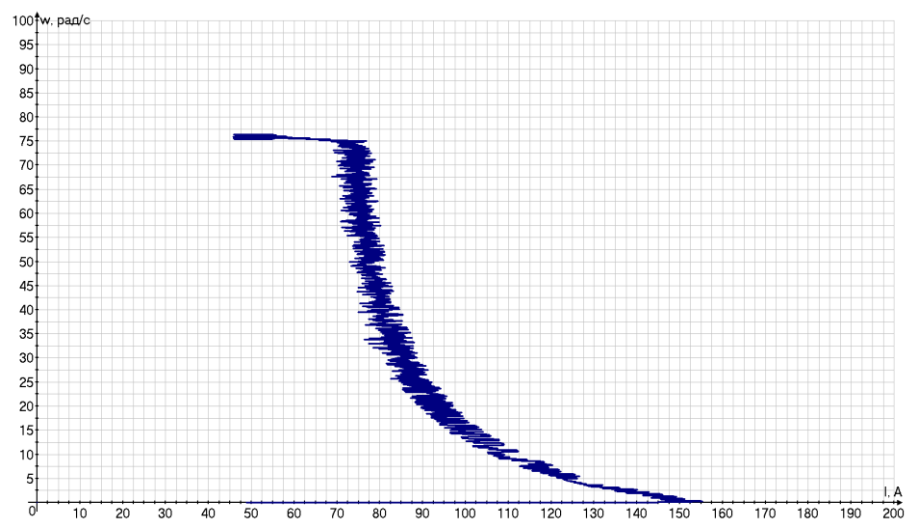


Рис. 10. Зависимость скорости от величины тока

Fig.10. Dependence of the speed on the current value

Следующая исследуемая схема с частотным векторным управлением представлена на рис. 11. Особенность данной системы в подключении ротора в цепь постоянного тока, оно реализовано по каскадной схеме. Модель также выполнена на базе автономного инвертора напряжения. Полученные графики в результате моделирования приведены на

рис. 12 и 13. По сравнению с предыдущим вариантом пуска двигателя, значение пускового тока осталось примерно на том же уровне, но произошло изменение в большую сторону пускового момента примерно на 50 процентов, что говорит о преимуществе данной схемы.

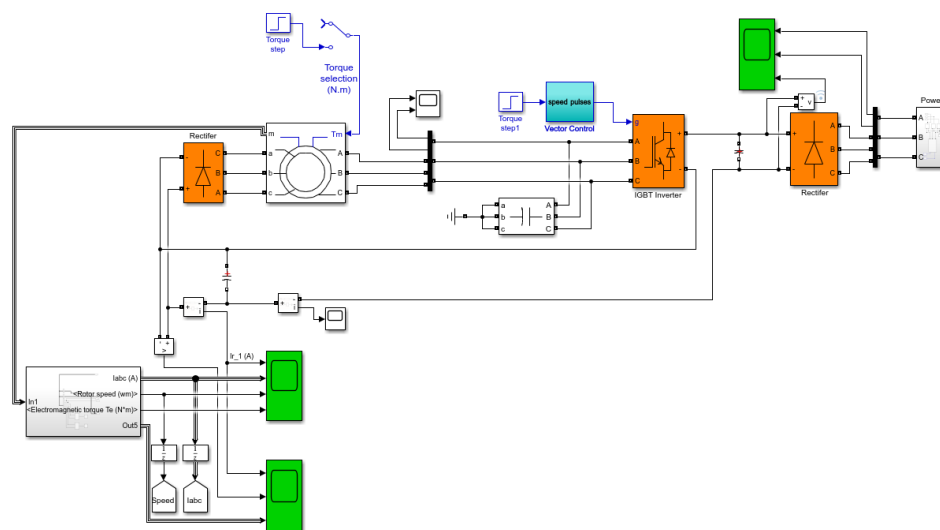


Рис. 11. Модель VI
Fig.11. Model.6.

Системы со слярным управлением и трансформатором в цепи ротора

На рис. 14 представлен усовершенствованный вариант системы управления, позволяющий осуществлять возврат энергии в цепь постоянного тока. В сехеме присутствует автономный инвертор напряжения и повышающий трансформатор, пуск происходит с постоянным скольжением, система однодвигательная. Коэффициент трансормации в исследуемой модели составляет 1:5, его расширение возможно до значения 1:20.

На рис. 15, 16, 17 представлены результаты моделирования. Нагрузка на валу двигателя в процессе пуска и разгона двигателя равна номинальной. По сравнению со схемным решение содержащим автономный инвертор тока, использование данной системы дает ряд преимуществ, в виде большего значения коэффициента полезной мощности, ускоренного времени выхода на устойчивый режим, при этом колебания отсутствуют, значения тока ниже во всем исследуемом диапазоне, крутящий момент выше.

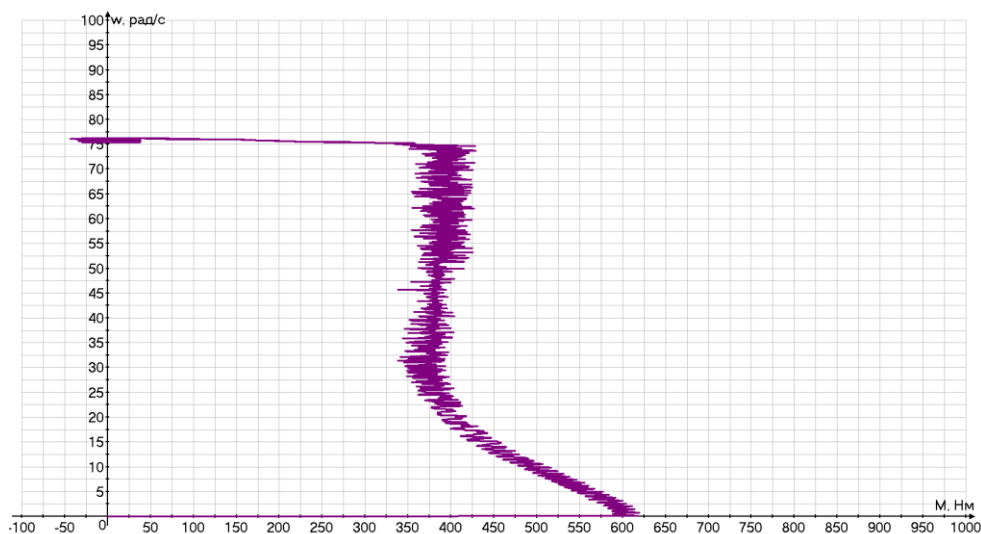


Рис. 12. Зависимость скорости от момента
Fig.12. Dependence of the speed on the moment

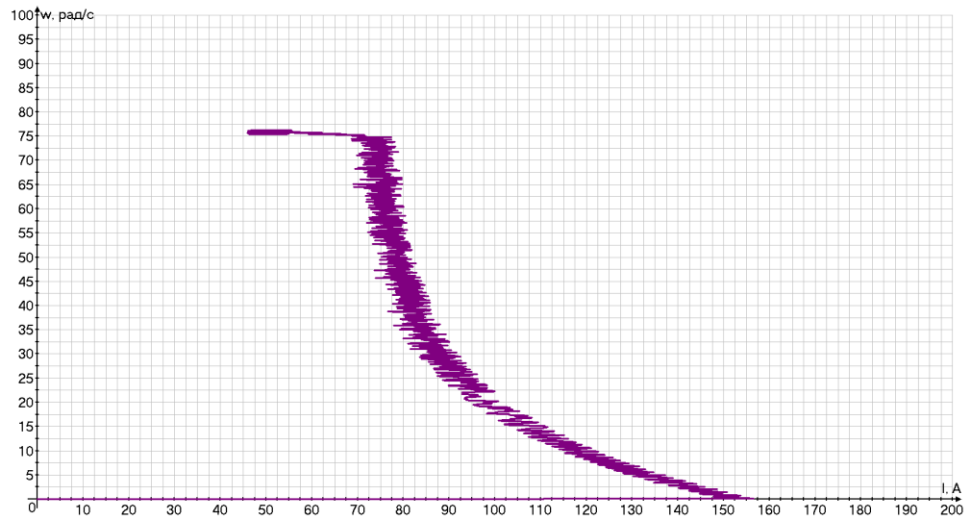


Рис. 13. Зависимость скорости от величины тока
Fig.13. Dependence of the speed on the current value

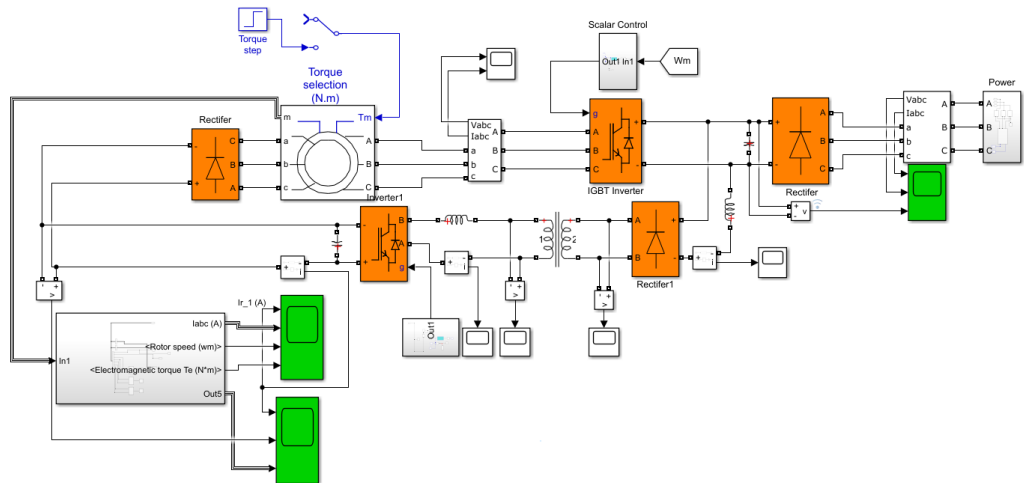


Рис. 14. Модель VII
Fig.14. Model 7

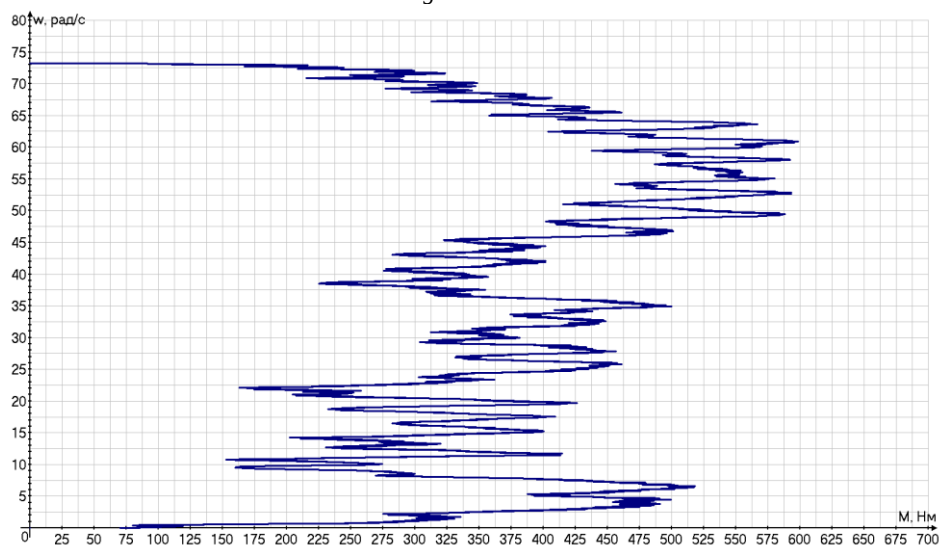


Рис. 15. Зависимость скорости от момента
Fig.15. Dependence of the speed on the moment

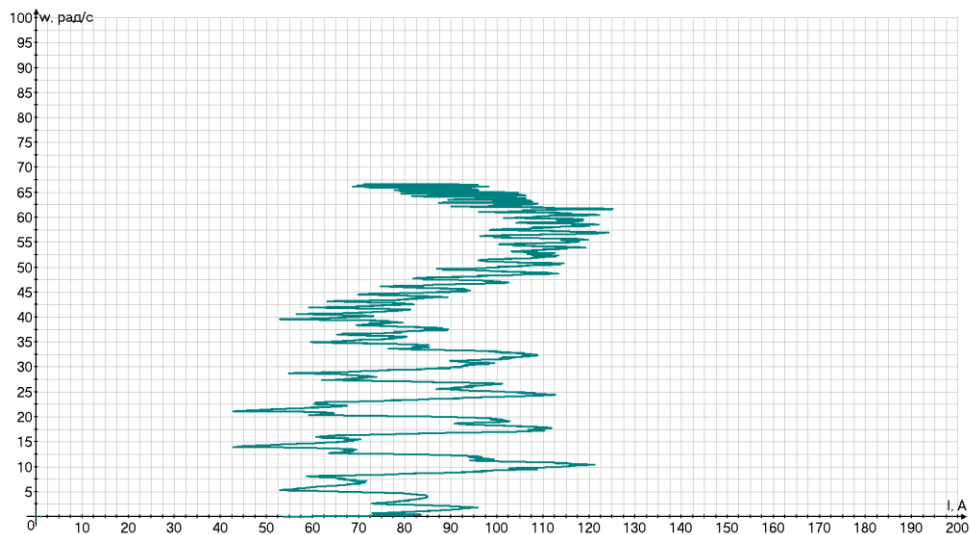


Рис. 16. Зависимость скорости от величины тока

Fig.16. Dependence of the speed on the current value

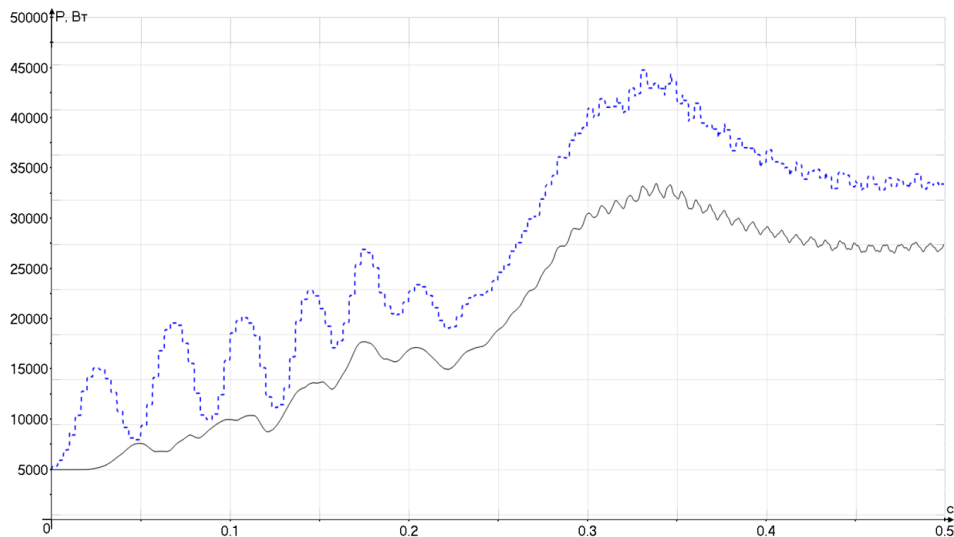


Рис. 17. Зависимость мощности от времени

Fig.17. Power versus time dependence

Двухмассовая система

Так как частой проблемой многомассовых механизмов является присутствие негативно сказывающихся на систему управления и на сам механизм колебаний, то на следующем этапе рассмотрена система с двум двигателями, гашение колебаний в которой возможно осуществить путем использования выше рассмотренной системы с трансформатором в цепи ротора.

Модель (рис. 18) представлена двумя однотипными двигателями, отличающимися лишь внутренними параметрами – данными момента инерции и значениями механических потерь. Данная схема представляет интерес с позиций снижения колебаний скорости в системе (рис. 19, 20), поэтому снятие остальных характеристик не производилось. Использование предлагаемого решения позволило демпфировать колебания без усложнения схемы, полученные механические характеристики отличаются плавностью нарастания скорости.

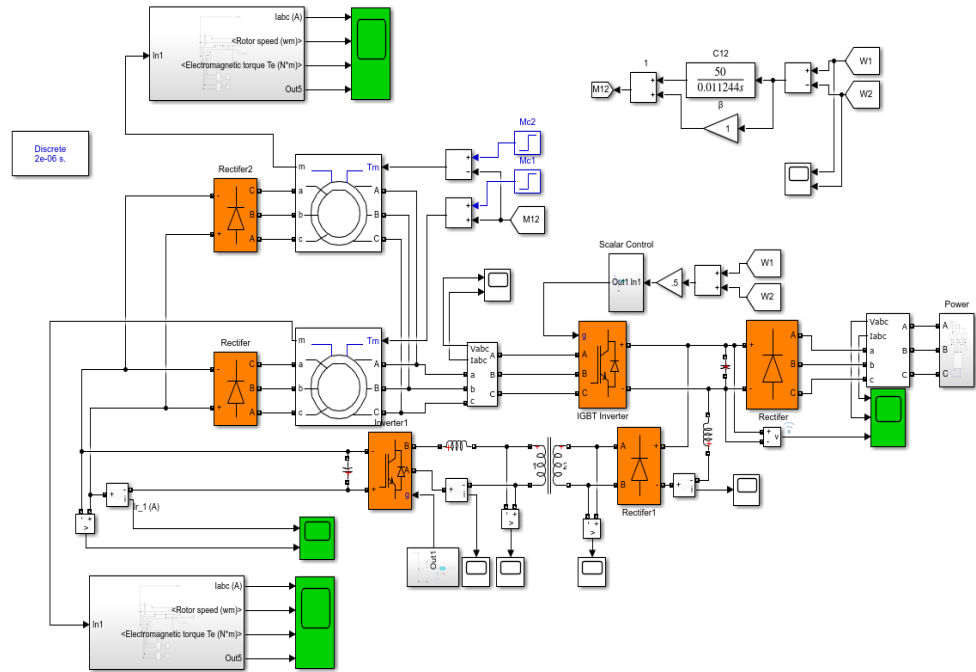


Рис. 18. Модель VIII

Fig.18. Model.8

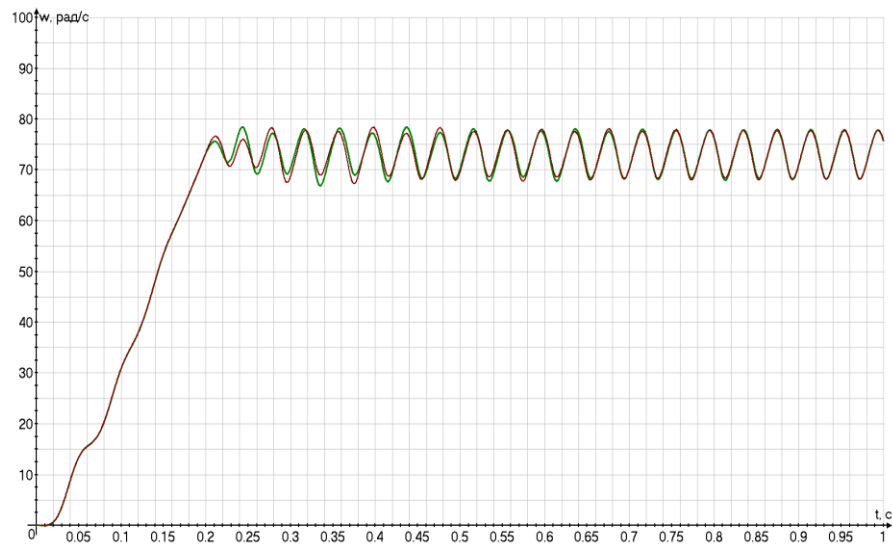


Рис. 19. Зависимость скорости от времени в системе с двумя двигателями без трансформатора

Fig.19. Speed versus time dependence in a system with two motors without a transformer

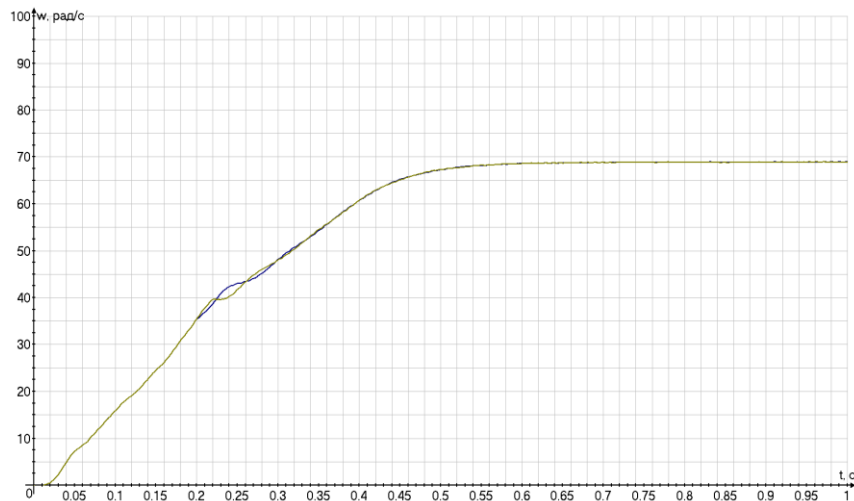


Рис. 20. Зависимость скорости от времени в системе с двумя двигателями с трансформатором
 Fig.20. The dependence of speed on time in a system with two motors with a transformer

Результаты и обсуждение

Заключительным этапом исследования стало сравнение энергетических параметров. Для моделирования выбраны две системы.

Первое схемное решение (рис. 21) содержит трехфазный повышающий трансформатор, подключение которого осуществлено посредством сглаживающего дросселя к выпрямителю не имеющему управления, коэффициент трансформации равен пяти. Возврат энергии скольжения в данной системе осуществляется в цепь постоянного тока, расположенную перед инвертором предназначенным для выдачи тока статора.

Второе схемное решение (рис. 22) позволяет осуществлять возврат энергии в трехфазную сеть, здесь расположенный перед трансформатором инвертор осуществляет синхронизацию с напряжением сети, что не допускает временного сдвига напряжения в фазе и исключает переток сети через трансформатор. Для уменьшения скачков тока, снижения скачкообразных перетоков энергии из цепи ротора в питающую сеть в схеме предусмотрен сглаживающий фильтр.

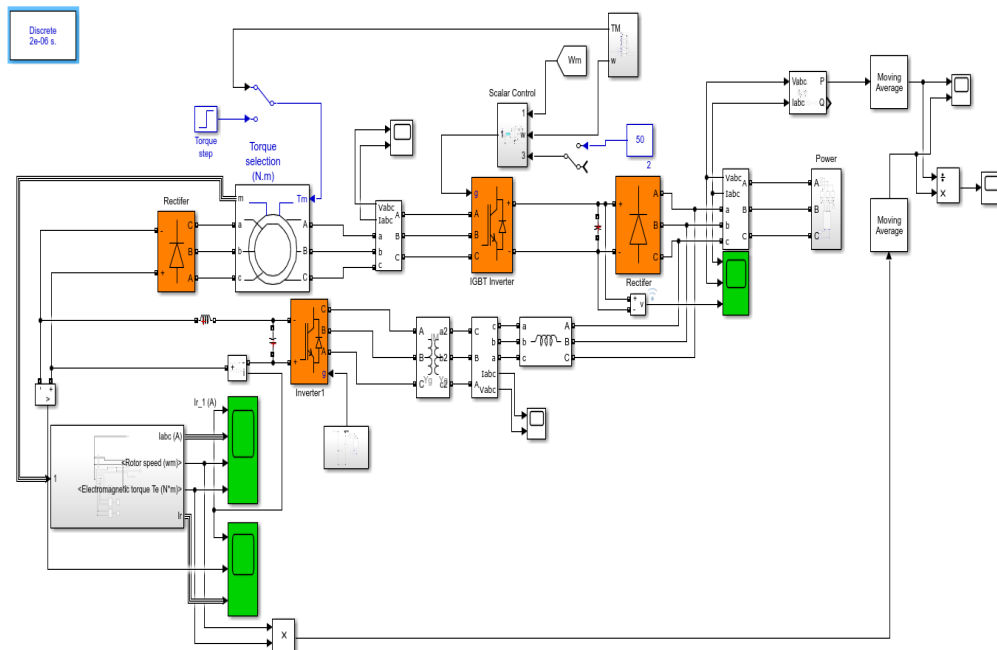


Рис. 21. Модель VIX
 Fig.21. Model VIX

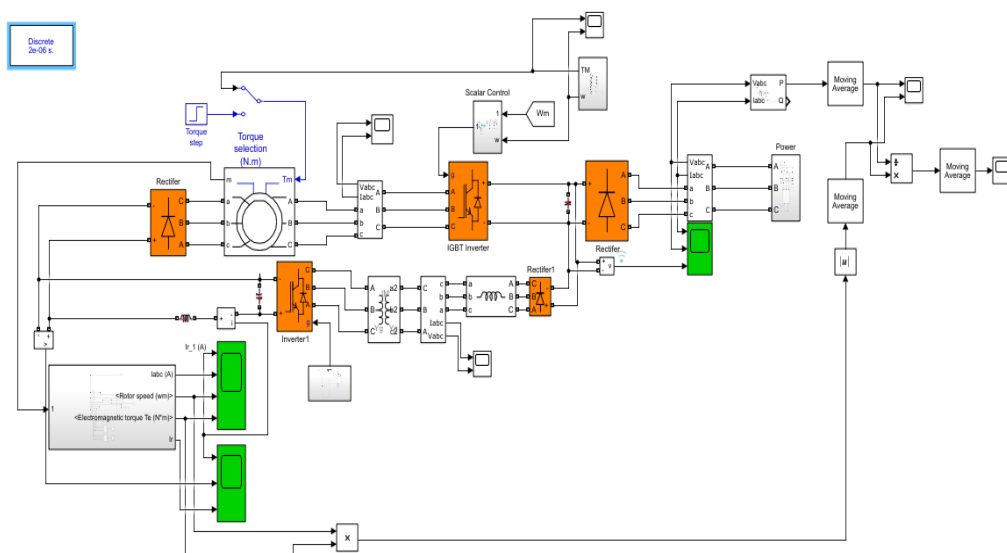


Рис. 22. Модель X
Fig.22. Model X

Используемые в обоих схемных решениях элементы идентичны.

В данном случае интерес представляют совмещенные результаты моделирования кпд (соотношение между активной энергией, потребляемой из сети и полезной механической энергией формируемой на валу двигателя). Снятие характеристик, представленных на рис. 23, осуществлялось в трех системах:

- системе с асинхронным двигателем работающей в режиме короткозамкнутого ротора с частотным управлением (характеристика 1);
- в системах содержащих асинхронный двигатель с фазным ротором и трехфазный трансформатор включенный в цепь ротора одна из которых осуществляет возвращение энергии в цепь постоянного тока (характеристика 2), вторая – в трехфазную сеть (характеристика 3).

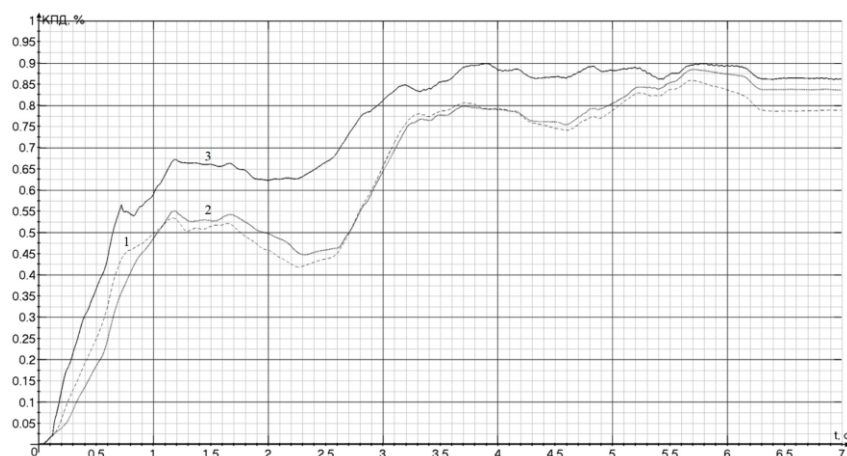


Рис. 23. Совмещенные графики кпд
Fig.23. Combined efficiency graphs

В системах содержащие трансформатор за счет более высокого регулирования частоты тока статора, происходит появление избыточной энергии скольжения, поэтому сумарный кпд становится больше. Увеличение нагрузки до значений близких к номинальным данным в системе с отдачей энергии в сеть имеет меньшее снижение значений кпд. Схожесть графиков системы содержащей асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с системой с отдачей энергии в цепь постоянного тока связана с присутствием значительных потерь в самом трансформаторе. Система с отдачей энергии в сеть более стабильна, по сравнению с системой с отдачей напряжения в цепь переменного тока, так как не содержит постоянно перезаряжающегося конденсатора.

Выводы

Произведенное в результате имитационного моделирования исследование имеет практическую направленность, связанную с возможностью исследования системы управления без ее материальной реализации на объекте. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что система с включением трансформатора в цепь ротора зарекомендовала себя хорошо по ряду показателей, в том числе и при использовании в двухдвигательном электроприводе.

Литература

1. Даденков Д.А., Солоцкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 11. С. 117-128.
2. Meshcheryakov V., Sinyukova, T., Sinyukov A., and Vladimirov O. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
3. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., et al. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
4. Abakumov A.M. and Randin D.G.. Research of Dual-Mass Oscillation System with Linear Motor // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEEM), Sochi, Russia. pp. 1–5 (25-27 March 2019).
5. Чебан В.М., Марков М.Ю., Бобрик В.И. Уменьшение пусковых токов асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Электричество. 2016. № 3. С. 57-60.
6. Григорьев Н.Д. Уменьшение пусковых токов асинхронных двигателей // Промышленная энергетика. 2010. №12. С. 7-11.
7. Злобин Д.С. Исследование способов уменьшения пускового тока асинхронного двигателя // Студенческий вестник. 2019. № 29-4 (79). С. 62-63.
8. Валов А.В. Энергетические показатели импульсно-векторного управления асинхронным электроприводом с фазным ротором // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2008. № 11 (111). С. 57-79.
9. Герман-Галкин С.Г. Аналитическое и модельное исследование асинхронной машины с фазным ротором при приложенных скольжениях // Электротехника. 2015 № 7. С. 58-65.
10. Коршунов А.И. Математическая модель асинхронного трехфазного двигателя с фазным ротором // Электротехника. 2021. №1. С 8-19.
11. Бубнов А.В., Мальгин Г.В., Ровкин В.Д. Оптимизация закона управления при пуске асинхронного электропривода с фазным ротором на основе моделирования динамических режимов его работы // Омский научный вестник. 2017. № 2 (152). С. 33-40.
12. Jiang You, Minghao Liu, Jiarui Ma, et al. Modeling and Analyse of Induction Motor Drive System with Consideration of DC Bus Stabilization and Control Performance // 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2016 – ECCE Asia). 2016. pp. 1362-1368.
13. Watanabe N, Hirotsuka I, Sugimoto H, et al. Trial Fixed Outer Rotor Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor and its Basic Characteristics // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea (South). 2018. pp. 135.
14. Weili L, Purui W, Yong L, et al. Influence of rotor structure on field current and rotor electromagnetic field of turbine generator under out-of-phase synchronization // 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Miami, FL, USA. 2016. pp. 94.
15. Vlad I, Campeanu A, Enache S. Enache M // 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). Iasi. 2017. pp. 98.

Авторы публикации

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк.
E-mail: stw0411@mail.ru.

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк.

Синюков Алексей Владимирович – аспирант кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк. E-mail: zeitsn@yandex.ru.

References

1. Dadenkov DA, Solotskii EM, Shachkov AM. Modelirovanie sistemy vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem v pakete Matlab/Simulink. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2018;11:117-128.
2. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. *Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems*. E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
3. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. *Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor*. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
4. Abakumov AM. and Randin D.G. *Research of Dual-Mass Oscillation System with Linear Motor*. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEM), Sochi, Russia. pp. 1–5 (25-27 March 2019).
5. Cheban VM, Markov MYu, Bobrik VI. Umen'shenie puskovykh tokov asinkhronnykh elektrodvigatelyi s korotkozamknutym rotorom. *Elektrichestvo*. 2016;3:57-60.
6. Grigor'ev ND. Umen'shenie puskovykh tokov asinkhronnykh dvigatelei. *Promyshlennaya energetika*. 2010;12:7-11.
7. Zlobin D.S. Issledovanie sposobov umen'sheniya puskovogo toka asinkhronnogo dvigatelya. *Studencheskii vestnik*. 2019;29-4(79):62-63.
8. Valov AV. Energeticheskie pokazateli impul'sno-vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom s faznym rotorom. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2008;11(111):57-79.
9. German-Galkin SG. Analiticheskoe i model'noe issledovanie asinkhronnoi mashiny s faznym rotorom pri prilozhennykh skol'zheniyakh. *Elektrotehnika*. 2015;7:58-65.
10. Korshunov A.I. Matematicheskaya model' asinkhronnogo trekhfaznogo dvigatelya s faznym rotorom. *Elektrotehnika*. 202;1:8-19.
11. Bubnov AV, Mal'gin GV, Rovkin VD. Optimizatsiya zakona upravleniya pri puske asinkhronnogo elektroprivoda s faznym rotorom na osnove modelirovaniya dinamicheskikh rezhimov ego raboty. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2017;2(152):33-40.
12. Jiang You, Minghao Liu, Jiarui Ma, et al. *Modeling and Analyse of Induction Motor Drive System with Consideration of DC Bus Stabilization and Control Performance*. 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2016 – ECCE Asia). 2016. pp. 1362-1368.
13. Watanabe N, Hirotaka I, Sugimoto H, et al. *Trial Fixed Outer Rotor Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor and its Basic Characteristics*. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea (South). 2018. pp. 135.
14. Weili L, Purui W, Yong L, et al. *Influence of rotor structure on field current and rotor electromagnetic field of turbine generator under out-of-phase synchronization*. 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Miami, FL, USA. 2016. pp. 94.
15. Vlad I, Campeanu A, Enache S, Enache M. A. *Study of direct-on-line starting of low power asynchronous motors*. 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). Iasi. 2017. pp.98.

Authors of the publication

Tatyana V. Sinyukova – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Viktor N. Meshcheryakov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Получено

15 февраля 2021г.

Отредактировано

18 февраля 2021г.

Принято

24 февраля 2021г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТОЧКИ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 6(10) КВ

Е.Е. Готовкина¹, А.А. Яблоков^{1,2}, Н.Н. Смирнов¹, А.В. Панащатенко², В.Д. Лебедев^{1,2},
О.А. Добрягина¹

¹Ивановский государственный энергетический университет имени
В.И. Ленина, г. Иваново, Россия

²НПО «Цифровые измерительные трансформаторы», г. Иваново, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0211-375X>, andrewyablokov@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблему надежности функционирования малогабаритных пунктов коммерческого учета электрической энергии (ПКУ), основанных на нетрадиционных измерительных преобразователях тока и напряжения (катушка Rogowski и резистивный делитель). Выявить наиболее тяжелые климатические условия, в которых могут эксплуатироваться ПКУ. Выполнить исследования теплового состояния ПКУ в различных режимах работы сети, а также при проведении высоковольтных испытаний. Определить условия, при которых тепловыделение на резистивном делителе достигает максимального значения. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись трехмерные гибридные полевые и цепные имитационные модели, рассчитываемые методом конечных элементов и методами теории линейных электрических цепей. Разработанные имитационные модели позволяют проводить исследования не только в нормальных, но и в аварийных режимах работы электрической сети, при грозовых и импульсных перенапряжениях, испытаниях изоляции и наличии инсоляции. РЕЗУЛЬТАТЫ. Приведены результаты исследований теплового состояния автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии класса напряжения 6(10) кВ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При использовании резистивного делителя в качестве первичного преобразователя напряжения наибольшее тепловыделение происходит при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю по теории Петерсона. Результаты выполненных исследований показали, что расчет ПКУ, основанного на резистивном делителе напряжения, должен выполняться на имитационных моделях с учетом инсоляции и суточного графика изменения максимальной температуры воздуха.

Ключевые слова: малогабаритный пункт учета электроэнергии; интеллектуальная энергосистема; преобразователь напряжения; однофазное замыкание на землю; инсоляция; тепловое состояние; имитационная модель.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке ПАО «МРСК Центра и Приволжья» в соответствии с договором на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Исследование физических процессов функционирования и разработка опытного образца автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) кВ с магнитотранзисторным преобразователем для нужд ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Для цитирования: Готовкина Е.Е., Яблоков А.А., Смирнов Н.Н., Панащатенко А.В., Лебедев В.Д., Добрягина О.А. Исследование теплового состояния автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) кв. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 182-196. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-182-196.

STUDYING THE THERMAL CONDITION OF AN AUTOMATED 6 (10) KV ELECTRIC POWER FISCAL METERING LOCATION

Е.Е. Gotovkina¹, А.А. Yablokov^{1,2}, N.N. Smirnov¹, A.V. Panashatenko², V.D. Lebedev^{1,2},
O.A. Dobryagina¹

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

²Research and Production Association "Digital Measurement Transformers", Ivanovo, Russia

andrewyablokov@yandex.ru

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0211-375X>, andrewyablokov@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Examine the problem of reliable functioning of small electric power fiscal metering locations (EPFML) based on unconventional instrument current and voltage converters (Rogowski coil and resistive divider). Identify the most severe environmental conditions in which EPFML can be operated. Conduct research into EPFML thermal condition in different grid operation modes, and also during high voltage testing. Determine the conditions in which heat emission at the resistor divider attains its maximum value. *METHODS.* To solve the problem, use was made of three-dimensional hybrid field and chain simulation models, calculated by the methods of finite elements and linear electric circuit theory. The developed simulation models enable research to be conducted not only in normal, but also emergency electric grid operation, during lightning and pulse surges, insulation testing, and in the presence of insolation. *RESULTS.* The article presents the results of research concerning the thermal condition of a 6 (10) kV automated electric power fiscal metering location. *CONCLUSION.* If a resistive divider is used as a primary voltage converter, maximum heat emission occurs in the event of intermittent single phase arc faults to earth in accordance with Petersen's theory. The results of the conducted research show that an EPFML based on a resistive voltage divider should be calculated using simulated models, taking into account insolation and the daily pattern of changes in maximum ambient temperature.

Keywords: compact electric power fiscal metering location; smart electric power system; voltage converter; single phase earth fault; insolation; thermal condition; simulation model.

Acknowledgments: This research was carried out with financial backing from PJSC «IDGC of Centre and Volga region» pursuant to an R & D agreement on studying the physical processes related to the functioning and development of a prototype automated 6(10) kV electric power fiscal metering location with a magneto-transistor converter for the needs of PJSC «IDGC of Centre and Volga region».

For citation: Gotovkina EE, Yablokov AA, Smirnov NN, Panashatenko AV, Lebedev VD, Dobryagina OA. Studying the thermal condition of an automated 6 (10) Kv electric power fiscal metering location. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1): 182-196. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-182-196.

Введение

В настоящее время, инновационное развитие электроэнергетики направлено на создание интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью, которая должна обладать такими свойствами как гибкость, обозреваемость, надежность, самодиагностика и др [1-8].

Одной из ключевых технологических областей интеллектуальной энергосистемы являются измерительные приборы и устройства, обеспечивающие обозреваемость сети [9]. Развитие микропроцессорной техники открыло возможность применения новых (нетрадиционных, маломощных) измерительных преобразователей тока и напряжения, не использовавшихся ранее в электроэнергетике и обладающих преимуществами перед электромагнитными трансформаторами тока и напряжения [10, 11]. К таким преобразователям относятся катушка Роговского, резистивный делитель, гальваномагнитные датчики и другие. Коллективом исследователей и конструкторов ООО НПО «ЦИТ» по заказу ПАО «МРСК Центра и Приволжья» была разработана автоматизированная точка коммерческого учета электроэнергии в сетях класса напряжения 6 (10) кВ (далее – АТКУЭ)¹, основанная на использовании нетрадиционных первичных преобразователей (рис. 1).

¹ Сайт ООО НПО ЦИТ. Доступно по: <https://digitrans.ru/> Ссылка активна на 22 октября 2020.

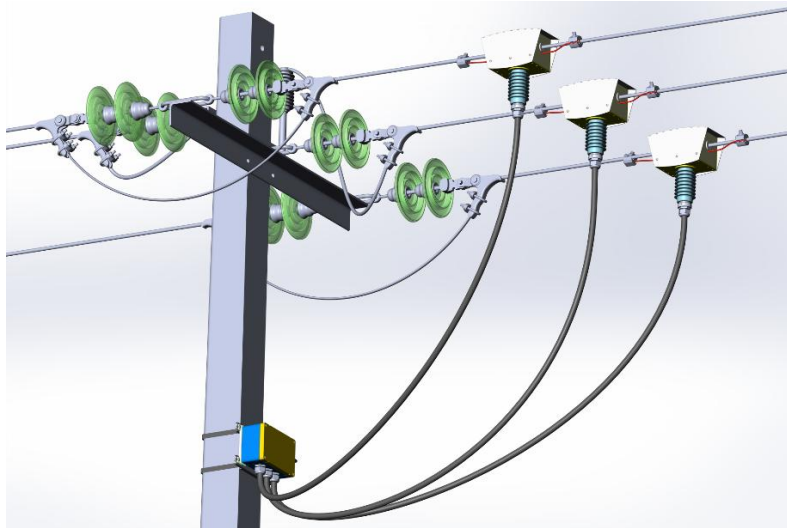


Рис. 1. Трехмерная модель АТКУЭ 6(10) кВ
Fig.1. Three-dimensional model of the 6(10) kV ASUE

Данное устройство предназначено для выполнения коммерческого учета электроэнергии на границе балансовой принадлежности (или месте, максимально приближенном к ней) объектов электроэнергетики смежных субъектов розничного рынка. Благодаря использованию нетрадиционных первичных преобразователей, имеющих низкие массогабаритные показатели, монтаж АТКУЭ выполняется на линии электропередач без разрыва токопровода и установки дополнительных монтажных конструкций. Кроме того, такое устройство не подвержено явлениям феррорезонанса, остаточной намагниченности и насыщения магнитопровода, а питание электроники осуществляется непосредственно от линии электропередачи.

Метрологические характеристики и надежность работы АТКУЭ являются основными эксплуатационными параметрами, определяющими качество её разработки и изготовления. Автоматизированная точка коммерческого учета электроэнергии должна нормально функционировать в сложных климатических условиях и при повреждениях в электрической сети (при температуре окружающего воздуха 40°C , в безоблачную погоду, в штиль, когда присутствуют значительные тепlopоступления на поверхность АТКУЭ от Солнца и при наличии однофазного замыкания на землю). В таких условиях одним из ключевых факторов, определяющих надежность работы АТКУЭ, является её тепловое состояние [12, 13], поскольку в качестве первичного преобразователя напряжения используется резистивный делитель. Применение таких технологий как тепловые трубки [14-16] для охлаждения элементов резистивного делителя невозможно с точки зрения обеспечения высоковольтной изоляции устройства. В связи с этим правильный выбор параметров резисторов и конструкции делителя напряжения АТКУЭ оказывает значительное влияние на её температурный режим работы, который может быть определен исключительно на имитационных моделях, учитывающих реальные условия эксплуатации. Емкостные делители, используемые в ряде аналогичных устройств [17,18], имеют такие недостатки как неравномерность амплитудно-частотной характеристики, препятствующая достоверному определению процентного содержания высших гармоник в кривой первичного напряжения, что необходимо для анализа качества электроэнергии, не всегда достаточную точность измерений, поскольку конденсаторы характеризуются диэлектрическими потерями и имеют существенную зависимость электрической емкости от приложенного напряжения и температуры, невозможность работы на постоянном токе, наличие остаточных зарядов, что приводит к высокой погрешности измерения при их повторном включении в переходных режимах [19-21].

Настоящая статья посвящена оценке теплового состояния АТКУЭ на имитационных моделях с целью определения оптимальных параметров её материалов и элементов.

Материалы и методы

Для исследования теплового состояния автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) кВ была разработана гибридная трехмерная имитационная математическая модель, структура которой представлена на рис. 2.

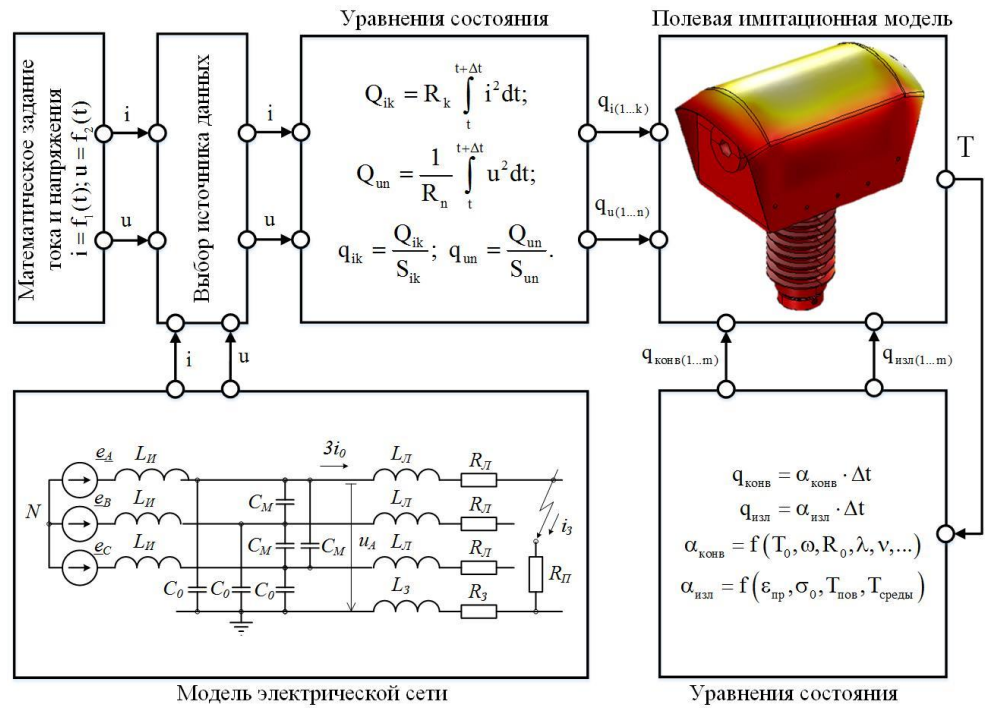


Рис. 2. Структура трехмерной гибридной имитационной модели АТКУЭ 6(10) кВ:

e_A, e_B, e_C – фазные ЭДС источника питания; L_{II} – эквивалентная индуктивность источника питания; C_0 – суммарная емкость фазы сети на землю; C_M – суммарная междофазная емкость сети; $3i_0$ – ток однофазного замыкания на землю; L_L и R_L – индуктивность и активное сопротивление поврежденной линии, соответственно; R_{II} – переходное сопротивление в месте повреждения; L_3 и R_3 – индуктивность и активное сопротивление контура обратного тока (земли), соответственно; u_A – напряжение на поврежденной фазе; $\alpha_{конв}$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи от поверхностей различных конфигураций; $\alpha_{изл}$ – коэффициенты теплоотдачи излучением

Fig.2. e_A, e_B, e_C -phase EMF of the power supply; L_I - equivalent inductance of the power supply, C_0 - total network phase capacity per ground, C_m - total inter-phase network capacity, $3i_0$ - single-phase ground fault current; L_i and R_i - the inductance and active resistance of the damaged line, respectively, R_p - transient resistance at the point of damage; L_3 and R_3 - inductance and active resistance of the reverse current circuit (ground), respectively, u_A - voltage on the damaged phase; $\alpha_{конв}$ - coefficients of convective heat transfer from surfaces of various configurations, $\alpha_{изл}$ - radiation heat transfer coefficients

Отличительной особенностью разработанной имитационной модели является совмещение модели электрической сети 6 (10) кВ и модели тепловых полей АТКУЭ, что достигается за счет использования уравнений закона Джоуля-Ленца.

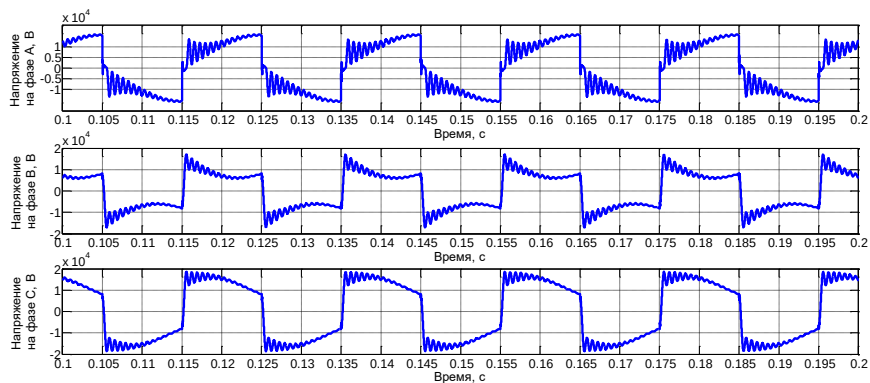
Блок математического задания тока и напряжения предназначен для аналитического или табличного формирования мгновенных значений тока, протекающего по первичному токопроводу, и напряжения прикладываемого к АТКУЭ. Данный блок используется при определении теплового состояния АТКУЭ в нормальном режиме работы, при грозовых и импульсных перенапряжениях, а также устойчивых повреждениях (например, устойчивых однофазных замыканиях на землю), в том числе при наличии гармонических искажений. Следует отметить, что при металлическом однофазном замыкании на землю (устойчивое повреждение) напряжение на неповрежденной фазе равно линейному напряжению сети (коэффициент перенапряжения равен $\sqrt{3}$).

Модель электрической сети используется для определения мгновенных значений токов и напряжений при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю (ДПОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью. Данный вид однофазного замыкания на землю и режим работы нейтрали выбраны исходя из максимально возможных длительных перенапряжений. Коэффициент перенапряжения при ДПОЗЗ в сети с изолированной нейтралью может достигать до 3,5-4 [22]. При других видах повреждений (устойчивые ОЗЗ и однократные самоустраняющиеся пробоя изоляции) и в сетях с другими режимами работы нейтрали (заземление через дугогасящий реактор или через резистор) коэффициенты длительных перенапряжений не превышают указанных

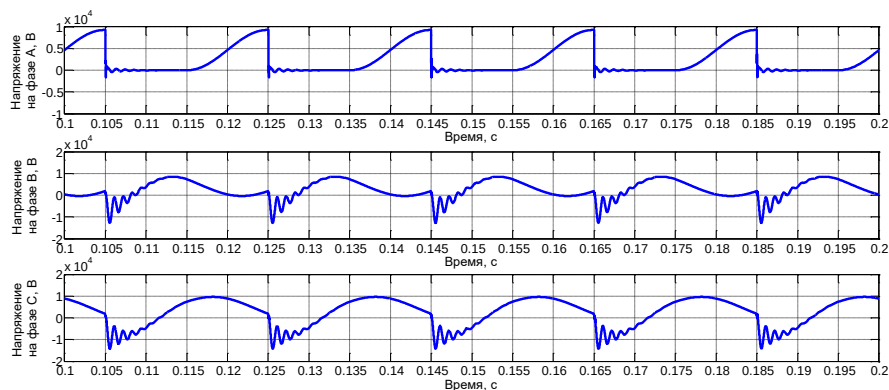
величин.

Моделирование ДПОЗЗ выполнено по следующим теориям:

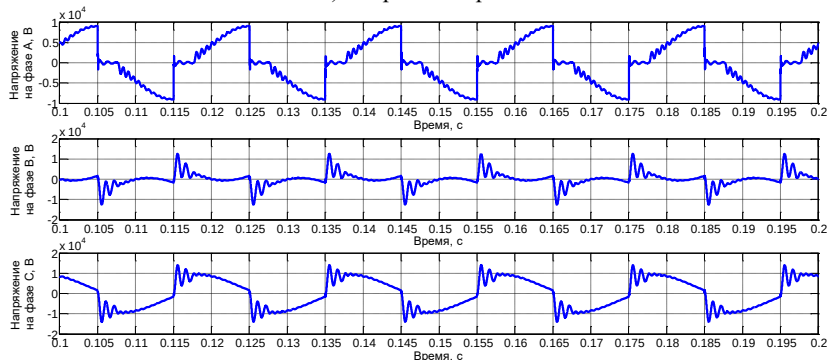
1. Теория Петерсена (рис. 3, а)[23].
2. Теория Петерса и Слепяна (рис. 3, б) [24].
3. Теория Белякова Н.Н. (рис. 3, в) [25].



а) теория Петерсена



б) теория Петерса и Слепяна



в) теория Белякова

Рис. 3. Напряжение при дуговом перемежающемся однофазном замыкании на землю фазы А в сети 6 кВ (емкостный ток сети 24,2 А)

Fig.3. Voltage at the arc intermittent single-phase earth fault of phase A in the 6 kV network (the capacitive current of the network is 24.2 A)

Полученные в результате расчета модели электрической цепи мгновенные значения токов и напряжений используются в интеграле Джоуля-Ленца для вычисления количества теплоты, выделяющегося на элементах АТКУЭ (q_u и q_i).

Полевая модель использует рассчитанные тепловыделения элементов АТКУЭ для определения её теплового состояния. Она включает уравнение теплового баланса (1), уравнения теплопроводности (2,3) и уравнения радиационного теплообмена между поверхностью и окружающей средой (4), уравнения поступления прямой и рассеянной солнечной радиации (5,6), дополненные граничными условиями тепловыделения на поверхности резистивного делителя и токопровода (7,8) и конвективного теплового потока (9)

$$Q_i + Q_u + Q_{\text{инс}}^{\text{пр}} + Q_{\text{инс}}^{\text{рас}} = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{изл}}, \quad (1)$$

$$\rho(T) \cdot C_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = Q, \quad (2)$$

$$\vec{q} = -\lambda(T) \cdot \nabla T, \quad (3)$$

$$-\vec{n} \cdot \vec{q}_{\text{изл}} = \alpha_{\text{изл}} \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср}}), \quad (4)$$

$$q_{\text{инс}} = q_{\text{инс}}^{\text{пр}} + q_{\text{инс}}^{\text{рас}}, \quad (5)$$

$$q_{\text{инс}}^{\text{пр}} = F_{\text{ext.Bi}} \cdot \vec{i}_s \cdot q_{0,s} \cdot FER_{\text{Bi}}(T_{\text{Солнца}}), \quad (6)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{q} = q_u, \quad (7)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{q} = q_i, \quad (8)$$

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = \alpha_{\text{конв}} (T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср}}), \quad (9)$$

где Q_i , Q_u – тепловые потоки, получаемые при прохождении тока через токопровод и от приложения напряжения на резистивный делитель, соответственно; $Q_{\text{инс}}^{\text{пр}}$, $Q_{\text{инс}}^{\text{рас}}$ – поступление теплоты от прямой и рассеянной солнечной радиации, соответственно; $Q_{\text{конв}}$, $Q_{\text{изл}}$ – конвективный и лучистый тепловые потоки от нагретой поверхности трансформатора к окружающему воздуху, соответственно; ρ – плотность материала; C_p – изобарная теплоемкость материала; T – температура; $\dot{q}$ – тепловой поток; λ – теплопроводность материала; ∇T – градиент температурного поля; $q_{\text{изл}}$ – удельный лучистый тепловой поток; $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением; $T_{\text{пов}}$ – температура на поверхности трансформатора; $T_{\text{среды}}$ – температура окружающей среды; $q_{\text{инс}}^{\text{пр}}$, $q_{\text{инс}}^{\text{рас}}$ – удельный тепловой поток от прямой и рассеянной солнечной радиации на поверхность; $F_{\text{ext.Bi}}$ – излучательная способность объекта; $q_{0,s}$ – плотность теплового потока от Солнца; $\vec{i}_s$ – вектор, описывающий местоположение Солнца относительно объекта, автоматически рассчитываемый в зависимости от координаты расположения объекта (географическая долгота, широта) и конкретного времени (часовой пояс, время, дата); $FER_{\text{Bi}}(T_{\text{Солнца}})$ – дробная излучательная способность при температуре Солнца, равной 5780 К; $\alpha_{\text{конв}}$ – конвективный коэффициент теплоотдачи от поверхностей различной конфигурации.

Данная система уравнений полевой модели дополняется уравнениями, описывающими коэффициент конвективной теплоотдачи для разных элементов АТКУЭ на основании^{2,3}.

Для задания наиболее неблагоприятных тепловых условий работы автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии 6(10) кВ в полевой модели был выполнен анализ изменения температуры воздуха и солнечной активности в летний период в Российской Федерации, а также было определено время их наибольшего суммарного значения.

Картина распределения средних из абсолютных максимумов температуры по регионам Российской Федерации представлена на рис. 4⁴. Средний из абсолютных максимумов температуры воздуха вычисляется как среднее многолетнее из абсолютных максимумов температуры за каждый отдельный год. Эта характеристика служит хорошим показателем наиболее высоких температур, наблюдаемых ежегодно в один из летних месяцев (как правило, в июне или июле). Анализ данных представленных в работах^{5,6} позволяет сделать вывод о том, что максимальные температуры воздуха находятся около отметки в 45 °С (Астраханская и Волгоградская области).

² Бухмиров, В.В. Тепломассообмен: учеб. пособие / В.В. Бухмиров. – Иваново, 2014. – 360 с.

³ Мартыненко, О.Г. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник. Мн.: Наука и техника, 1982. 400 с.

⁴ Национальный атлас России. Том 2. Природа. Экология. Доступно по: <https://национальныйатлас.рф>. Ссылка активна на 22 октября 2020.

⁶ Свод правил СП 131.13330.2018 Строительная климатология. М: Минстрой России, 2018. 107 с.

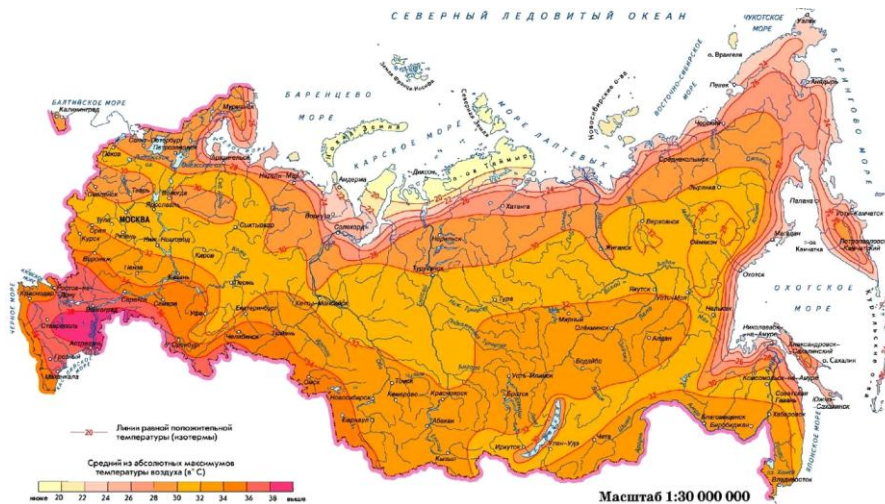


Рис. 4. Изотермы средних из абсолютных максимумов температуры воздуха, °С, по состоянию на 2010 год

Fig.4. Isotherms of the average of the absolute maximum air temperature, °C, as of 2010

Суточная амплитуда колебаний температуры воздуха зависит от интенсивности солнечной радиации, соотношения продолжительности дня и ночи и прозрачности атмосферы. Существенное значение имеют широта местности, высота ее над уровнем моря, время года и др. На экваторе амплитуда наибольшая, так как день и ночь имеют относительно равную продолжительность. На полюсах она наименьшая, поскольку летом солнце там совсем не заходит (полярный день). Рельеф и характер местности, погода и некоторые другие факторы оказывают определенное влияние на суточную амплитуду. Так, например, она менее выражена над большими водными поверхностями, чем над сушей, так как вода, обладая более высокой теплоемкостью, способна накапливать тепло в большей степени и медленнее его отдавать. При наличии растительного покрова или в пасмурную погоду суточная амплитуда также уменьшается, так как растительность, так же как и облачность, замедляет нагрев и охлаждение почвы. На основе данных по поступлению теплоты солнечной радиации⁷ и определенной ранее максимальной температуры воздуха в России был составлен наиболее «тяжелый» суточный ход температуры воздуха для условий работы АТКУЭ 6(10) кВ (табл. 1).

Таблица 1

Суточный ход температуры воздуха, используемый в модели (построен на основе данных для поселка городского типа Баскунчак Астраханской области (48 град. северной широты, 46,5 вост. долготы)⁸)

Время суток, часы	0	3	6	9	12	15	18	21
Температура воздуха, °С	36	32	36	40	43	45	42	38

Немаловажным фактором, влияющим на тепловое состояние АТКУЭ 6(10) кВ, является воздействие инсоляции. На рис. 5 представлены зависимости поверхностной плотности потока суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной) в июле от времени суток и месторасположения объекта, построенные на основании данных⁹ [26]. Анализ представленных данных показывает, что наибольший средний тепловой поток на территории Российской Федерации от Солнца составляет 920 Вт/м².

⁷ Львовский И.Б. Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения / И.Б. Львовский, Б.В. Баркалов. М.: Промстройпроект, 1991. 34 с.

⁸ Там же. табл. 7.

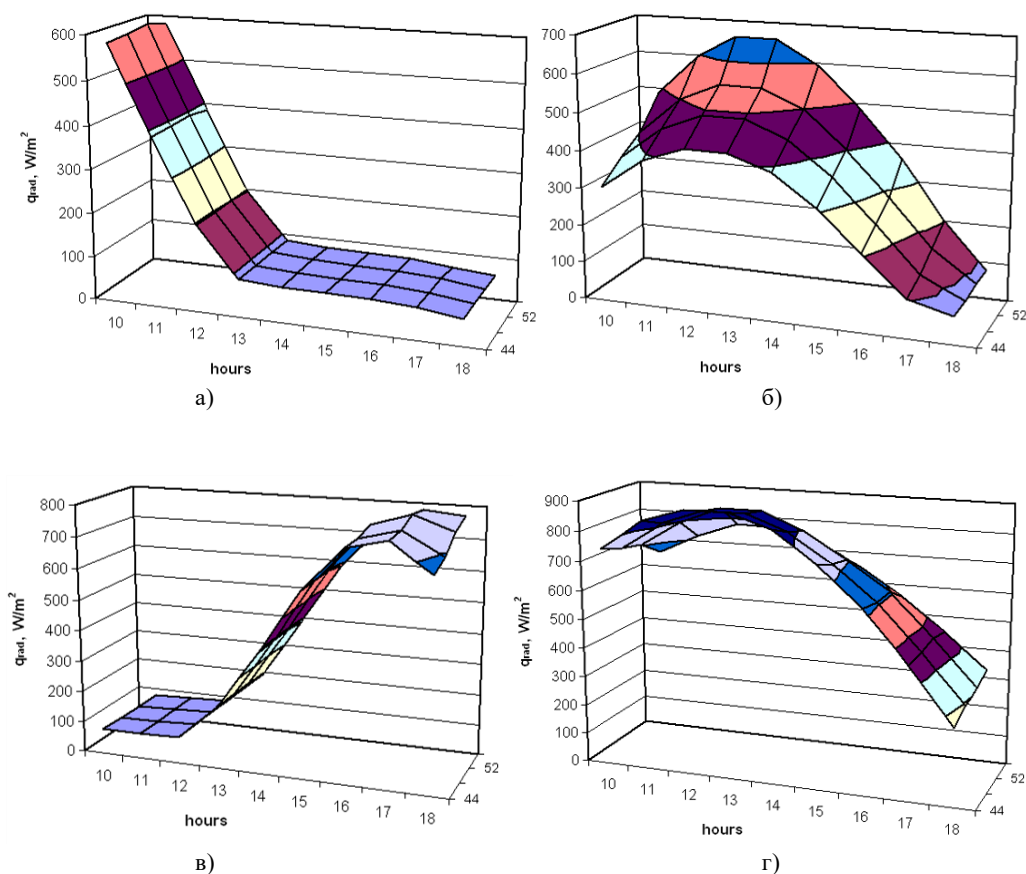


Рис. 5. Поверхностная плотность потока суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной) в июле, Вт/м², в зависимости от времени суток и месторасположения объекта (градусы северной широты) для восточной (а), южной (б), западной (в) вертикальных и горизонтальной (г) ориентаций поверхности

Fig.5. Surface flux density of total solar radiation (direct and scattered) in July, W / m², depending on the time of day and the location of the object (degrees north latitude) for the eastern (a), southern (b), western (c) vertical and horizontal (d) surface orientations

Следует также отметить, что в соответствии с ГОСТ 15150-69¹⁰ для изделий, поверхности которых подвергаются нагреву солнцем и имеют цвет отличный от белого или серебристо-белого, предельное рабочее значение температуры должно приниматься выше на 30 °С по сравнению с изделиями, которые не работают под прямым воздействием солнца. Данные требования также были учтены при проведении отдельной серии экспериментов на имитационных моделях.

Для обеспечения надежной работы автоматизированной точки коммерческого учета электроэнергии необходимо, чтобы её температура во всех режимах работы не превышала 155°С (при более высоких температурах начинается необратимая деградация материалов).

Результаты

Исследования теплового состояния АТКУЭ 6(10) кВ выполнялись в следующих режимах работы:

- 1) нормальный режим работы сети при номинальном напряжении на АТКУЭ (6/√3 и 10/√3 кВ);
- 2) нормальный режим работы сети при наибольшем рабочем напряжении на АТКУЭ (7,2/√3 и 12/√3 кВ);
- 3) устойчивое однофазное замыкание на землю – напряжение на АТКУЭ составляет 7,2 или 12 кВ;
- 4) дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю;
- 5) испытание изоляции АТКУЭ (20 кВ в течение 1 минуты – для номинального

¹⁰ ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/1200003320> Ссылка активна на 30 апреля 2020.

напряжения 6 кВ и при измерении частичных разрядов; 32 кВ в течение 1 минуты – для номинального напряжения 6 кВ и без измерений частичных разрядов; 28 кВ в течение 1 минуты – для номинального напряжения 10 кВ и при измерении частичных разрядов; 42 кВ в течение 1 минуты – для номинального напряжения 10 кВ и без измерений частичных разрядов).

В табл. 2 и 3 представлены результаты выполненных исследований теплового состояния АТКУЭ 6(10) кВ в указанных выше режимах при наличии и отсутствии инсоляции.

Таблица 2

Результаты исследования теплового состояния АТКУЭ 6(10) кВ на имитационной модели для условий эксплуатации

Режим	Максимальная температура резистивных элементов, °С					
	Без инсоляции		С инсоляцией		Требования ГОСТ 15150-69	
	R ₁	R ₂	R ₁	R ₂	R ₁	R ₂
Сеть с изолированной нейтралью, класс напряжения 6 кВ						
Номинальный режим, напряжение 6,0/√3 кВ	47,5	45,5	58,1	57,0	78,0	76,1
Номинальный режим, напряжение 7,2/√3 кВ	48,7	46,0	58,9	57,2	79,2	76,5
Устойчивое однофазное замыкание на землю, напряжение 7,2 кВ	56,1	48,7	64,0	58,9	86,7	79,2
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 6 кВ, величина емкостного тока 24,2 А, теория Петерсона	84,3	58,9	85,8	66,2	115,3	89,5
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 6 кВ, величина емкостного тока 24,2 А, теория Петерса и Слепяна	56,0	48,7	64,0	58,9	86,6	79,2
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 6 кВ, величина емкостного тока 24,2 А, теория Белякова	56,2	48,7	64,1	58,9	86,8	79,3
Сеть с изолированной нейтралью, класс напряжения 10 кВ						
Номинальный режим, напряжение 10,0/√3 кВ	52,3	47,3	60,8	58,0	82,7	77,8
Номинальный режим, напряжение 12,0/√3 кВ	55,3	48,4	63,5	58,7	85,9	78,9
Устойчивое однофазное замыкание на землю, напряжение 12,0 кВ	74,5	55,3	77,9	63,5	105,2	85,9
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 10 кВ, величина емкостного тока 20 А, теория Петерсона	157,7	84,8	144,0	86,2	188,9	115,68
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 10 кВ, величина емкостного тока 20 А, теория Петерса и Слепяна	74,0	55,1	77,4	63,3	104,6	85,7
Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, номинальное напряжение сети 10 кВ, величина емкостного тока 20 А, теория Белякова	66,1	52,3	71,5	61,4	96,6	82,8

Примечание 1. $R_2=3 \cdot R_1$.

Примечание 2. Величина емкостного тока выбрана в соответствии с требованиями ПУЭ для электрических сетей с изолированной нейтралью.

Таблица 3

Результаты исследования теплового состояния АТКУЭ 6(10) кВ на имитационной модели для условий лабораторных испытаний

Режим	Температура резистивных элементов, °C	
	R ₁	R ₂
Класс напряжения 6 кВ		
Испытание изоляции с измерением частичных разрядов, напряжение 20 кВ в течение 1 минуты	39,0	29,6
Испытание изоляции без измерения частичных разрядов, напряжение 32 кВ в течение 1 минуты	64,4	36,8
Класс напряжения 10 кВ		
Испытание изоляции с измерением частичных разрядов, напряжение 28 кВ в течение 1 минуты	52,3	34,1
Испытание изоляции без измерения частичных разрядов, напряжение 42 кВ в течение 1 минуты	92,9	45,5

Обсуждение

Анализ результатов выполненных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1) Конструкция АТКУЭ защищает первичный преобразователь напряжения на основе резистивного делителя от прямого воздействия солнечных лучей в период наибольшей суточной температуры воздуха (рис. 6, б). Прямое воздействие солнечных лучей на первичный преобразователь напряжения (рис. 6, а) происходит только в период температурного минимума окружающего воздуха (на восходе и закате Солнца). Данный вывод подтверждается сведениями, приведенными в работах [27, 28], где указано, что наибольшее значение температуры воздуха при ясной погоде фиксируется в период с 13 по 16 часов, когда поверхность почвы и расположенные на ней объекты достаточно прогреваются от Солнца, а температурный минимум наступает перед восходом Солнца, когда она наиболее охлаждена. Благодаря указанным обстоятельствам суточный график максимальной температуры резистивных элементов АТКУЭ является более равномерным по сравнению с максимальной температурой поверхностей АТКУЭ (рис. 7).

2) Максимальная температура резистивных элементов при отсутствии инсоляции наблюдается в период максимума температуры воздуха, а при наличии инсоляции – на восходе и закате Солнца.

3) Температура резистивных элементов при учете инсоляции в соответствии с требованиями ГОСТ 15150-69 путем увеличения температуры окружающего воздуха на 30 °C является значительно завышенной, а температура поверхностей АТКУЭ заниженной.

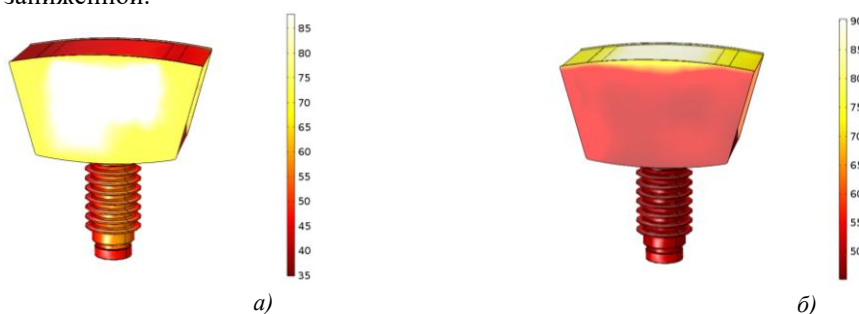


Рис. 6. Тепловое поле АТКУЭ при $U=10,0/\sqrt{3}$ кВ и $R=R_1$: а –6:00; б –15:00
Fig.6. ATCUE thermal field at $U=10,0/\sqrt{3}$ kV and $R=R_1$: а -6: 00; b -15:00

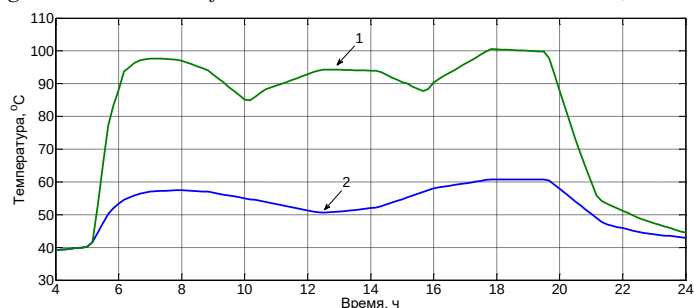


Рис. 7. Суточный график максимальной температуры поверхностей АТКУЭ (1) и резистивных элементов (2) при $U=10,0/\sqrt{3}$ кВ и $R=R_1$

Fig.7. Daily graph of the maximum surface temperature of ATCUS (1) and resistive elements (2) at $U=10,0/\sqrt{3}$ kV and $R=R_1$

Заключение

Результаты выполненных исследований показывают, что наибольший температурный градиент возникает при испытаниях высоковольтной изоляции, а наибольшую температуру резистивные элементы имеют при однофазных замыканиях на землю. В воздушных линиях электропередач процент дуговых замыканий достигает 80 % [29]. Наибольшее тепловыделение на резисторах происходит при ДПОЗЗ по теории Петерсона (примерно 1% от всех ДПОЗЗ). Известно, что емкостный ток в воздушных линиях электропередачи, ниже, чем в кабельных линиях [30], а, соответственно, и перенапряжения (тепловыделения на резисторах) при ДПОЗЗ в воздушных линиях также ниже по сравнению с полученными значениями (табл. 2). По мнению авторского коллектива, учитывая тот факт, что ДПОЗЗ по теории Петерса и Слепяна, а также по теории Белякова наиболее распространены и тепловыделения при них совпадают с тепловыделениями при устойчивых ОЗЗ необходимо рассчитывать малогабаритные пункты коммерческого учета электроэнергии на длительный режим работы при последних из указанных повреждений. При этом расчет теплового состояния должен выполняться на имитационных моделях с учетом инсоляции и других факторов внешней среды.

Литература

1. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. Москва, 2012. 51 с. Доступно по: [https:// www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas). Ссылка активна на 22 октября 2020.
2. Концепция «Цифровая трансформация 2030». Москва, 2018 г. 31 с. Доступно по: https://www.rosseti.ru/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030. Ссылка активна на 22 октября 2020.
3. Colak I., Bayindir R, Sagioglu S. The Effects of the Smart Grid System on the National Grids. icSmartGrid: Proceedings of the conference 8th International Conference on Smart Grid; 17-19 June 2020; Paris, France; 2020.
4. Agalgaonkar Y.P., Hammerstrom D.J. Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience // IEEE Power and Energy Technology Systems Journal. 2017. V. 4. N2. pp. 24-31.
5. Bansal P., Singh A. Smart metering in smart grid framework: A review. PDGC: Proceedings of the conference Fourth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing; 22-24 Dec. 2016; Wanknaghat, India; 2017.
6. Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р., Абдуллазянов Р.Э. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 10-18.
7. Васев А.Н., Мисбахов Р.Ш., Зиганшина А.И., Федотов В.В. Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 16-26.
8. Agalgaonkar Yashodhan P., Hammerstrom Donald J. Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience // IEEE Power and Energy Technology Systems Journal. 2017. V. 4. № 2. pp. 24-31.
9. Li Zhe, Dai Y., Wang Q., Dong X. Application of High-Voltage Electrical Energy Meter in Smart Grid. ICMCCE: Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering; 14-16 Sept. 2018; Huhhot, China; 2018.
10. Zhang A., Song S., Wang Ch., et al. Research of an integrated high-voltage energy metering device. CCC: Proceedings of the 36th Chinese Control Conference; 26-28 July 2017; Dalian, China; 2017.
11. Gebauer J., Podešva P., Fojtík D., Mahdal M. The Welding Current and Voltage Smart Sensor. ICCS: Proceedings of the conference 20th International Carpathian Control Conference; 26-29 May 2019; Krakow-Wieliczka, Poland; 2019.
12. Аль-Аомари О., Ваньков Ю.В., Костылева Е.Е., Валиев Р.Н. Методика обработки результатов тепловизионных обследований высоковольтного оборудования. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015; №11-12. С. 80-86.

13. Дмитриев А.В., Валиев И.И., Дмитриева О.С. Исследование работы термоэлектрического преобразователя в системе охлаждения энергетического оборудования. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015; № 11-12. с. 60-63.
14. Pengbo Yin, Zuoming Xu, Wei Hu, et al. Temperature Homogenization Technology of Current Carrying Conductor in the Valve Side Bushing of Converter Transformer Based on the Heat Pipe Theory. ICHVE: Proceedings of the IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application; 6-10 Sept. 2020; Beijing, China; 2020.
15. Xiaoling Yu, Zhiyuan Liu, Quanke Feng, et al. Research on a gravity heat pipe for high voltage vacuum interrupter. Proceedings of the 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum; 15-19 Sept. 2008; Bucharest, Romania; 2008.
16. Blumenfeld P.E., Prenger C., et al. High temperature superconducting current lead test facility with heat pipe intercepts// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 1999. V. 9. № 2. pp. 527-530.
17. Kang B., Hou T., Bu Z., et al. High-voltage electrical energy meter with measurement chips floating at 10 kV potentials // IET Science, Measurement & Technology. 2016. V. 10. N3. pp. 159-166.
18. Xin Y., Mingshuai Ch., Xinyang Li, et al. Research of three-phase high-voltage energy metering device. CAC: Proceedings of the conference Chinese Automation Congress; 20-22 Oct. 2017; Jinan, China; 2018.
19. Журавлев А.А. Высоковольтный резистивный делитель на базе литого микропровода в стеклянной изоляции на рабочие напряжения 6-24 кВ переменного тока промышленной // Проблемы региональной энергетики. 2008. №3. С. 104-117.
20. Denicolai M., Hällström J. A Self-balanced, Liquid Resistive, High Impedance HV Divider. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering; 25-29 August 2005; Tsinghua University, Beijing, China; 2005. Paper J-05. Доступно по: <http://www.saunalahti.fi/dnmcrc1/wprobe/wprobe.pdf>. Ссылка активна на 23 октября 2020.
21. Yongdong Li, Qing-da Meng, Po, Yang Zheyuan Zhao, et al. Analysis on the Influence Factors of Capacitor Voltage Transformer Dielectric Loss Measurement // Energy and Power Engineering. 2013. №5. pp. 1240-1242.
22. Воробьева Е.А. Совершенствование принципов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Иваново; 2018. Доступно по: http://ispu.ru/files/Avtoreferat_Vorobeia_E.A..pdf. Ссылка активна на 23 октября 2020.
23. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. 1917. Н. 37, 38.
24. Peters I.E. Voltage Induced by Arcing Ground // Tr. AIEE. 1923. P. 478.
25. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. 1957. № 5. С. 31–36.
26. Пыжов В.К., Смирнов Н.Н. Системы кондиционирования, вентиляции и отопления. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 528 с.
27. Погосян Х.П. Воздушная оболочка земли. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1962 291 с.
28. Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1967. 302 с.
29. Горюнов В. Однофазное замыкание на землю. Можно ли решить проблему? // Новости электротехники. 2017. №2(104). Доступно по: <http://www.news.elteh.ru/arh/2017/104/04.php>. Ссылка активна на 23 октября 2020.
30. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с.

Авторы публикации

Готовкина Елена Евгеньевна – аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Ивановский государственный энергетический университет.

Яблоков Андрей Атанольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматического

управления электроэнергетическими системами (АУЭС) ИГЭУ; директор по науке и инновациям НПО «Цифровые измерительные трансформаторы».

Смирнов Николай Николаевич – старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики ИГЭУ.

Панащатенко Антон Витальевич – инженер НПО «ЦИТ».

Лебедев Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук, заведующий АУЭС ИГЭУ; генеральный директор НПО «ЦИТ».

Добрягина Ольга Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры АУЭС ИГЭУ.

References

1. *Osnovnye polozheniya kontseptsii intellektual'noi energosistemy s aktivno-adaptivnoi set'yu*, Moscow, 2012. Available at: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas. Accessed to: 22 Oct 2020.
2. *Kontsepsiya "Tsifrovaya transformatsiya 2030"*, Moscow, 2018. Available at: https://www.rosseti.ru/Kontsepsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030. Accessed to: 22 Oct 2020.
3. Colak I, Bayindir R, Sagiroglu S. *The Effects of the Smart Grid System on the National Grids. icSmartGrid: Proceedings of the conference 8th International Conference on Smart Grid*; 17-19 June 2020; Paris, France; 2020. doi: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144891
4. Agalgaonkar YP, Hammerstrom DJ. Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. 2017;4(2):24-31. doi: 10.1109/JPETS.2017.2683502
5. Bansal P, Singh A. *Smart metering in smart grid framework. A review. PDGC: Proceedings of the conference Fourth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing*; 22-24 Dec. 2016; Wanknaghat, India; 2017. doi: 10.1109/PDGC.2016.7913139
6. Gracheva EI, Sadykov RR, Khusnutdinov RR, et al. Investigation of the parameters of reliability of low voltage commutation devices on operating data of industrial enterprises. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2019;21:1-2:10-18. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18.
7. Vasev AN, Misbakhov RSh, Ziganshina AI, et al. Combine communications optical network of scada of electric power station and substation. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2018;20(11):16-26. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-16-26.
8. Agalgaonkar Yashodhan P, Hammerstrom Donald J. Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. 2017;4(2):24-31.
9. Li Zhe, Dai Y, Wang Q, et al. *Application of High-Voltage Electrical Energy Meter in Smart Grid. ICMCCE: Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering*; 14-16 Sept. 2018; Huhhot, China; 2018. doi: 10.1109/ICMCCE.2018.00028.
10. Zhang A, Song S., Wang Ch, et al. *Research of an integrated high-voltage energy metering device. Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*; 26-28 July 2017; Dalian, China; 2017. doi: 10.23919/ChiCC.2017.8028551.
11. Gebauer J, Podešva P, Fojtík D, et al. *The Welding Current and Voltage Smart Sensor. ICC: Proceedings of the conference 20th International Carpathian Control Conference*; 26-29 May 2019; Krakow-Wieliczka, Poland; 2019. doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8766018.
12. Al-Aomari O, Vankov JV, Kostyleva EE, et al. Method of treatment results thermal imaging inspection of high voltage equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;11-12:80-86. doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-11-12-80-86
13. Dmitriev AV, Valiev II, Dmitrieva OS. The study of thermoelectric converter in the

cooling system of the power equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;11-12:60-63. doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-11-12-60-63.

14. Pengbo Yin, Zuoming Xu, Wei Hu, et al. *Temperature Homogenization Technology of Current Carrying Conductor in the Valve Side Bushing of Converter Transformer Based on the Heat Pipe Theory*. ICHVE: Proceedings of the IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application; 6-10 Sept. 2020; Beijing, China; 2020.

15. Xiaoling Yu, Zhiyuan Liu, Quanke Feng, et al. *Research on a gravity heat pipe for high voltage vacuum interrupter*. Proceedings of the 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum; 15-19 Sept. 2008; Bucharest, Romania; 2008.

16. Blumenfeld PE, Prenger C, et al. *High temperature superconducting current lead test facility with heat pipe intercepts*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 1999;9(2):527-530.

17. Kang B, Hou T, Bu Z, et al. High-voltage electrical energy meter with measurement chips floating at 10 kV potentials. *IET Science, Measurement & Technology*. 2016;10(3):159-166. doi: 10.1049/iet-smt.2014.0280.

18. Xin Y, Mingshuai Ch, Xinyang Li, et al. *Research of three-phase high-voltage energy metering device*. CAC: Proceedings of the conference Chinese Automation Congress; 20-22 Oct. 2017; Jinan, China; 2018. doi: 10.1109/CAC.2017.8243828

19. ZHuravlev AA. *Vysokovol'tnyj rezistivnyj delitel' na baze litogo mikroprovoda v steklyannoj izolyacii na rabochie napryazheniya 6-24 kV peremennogo toka promyshlennoj chastoty*. A.A. ZHuravlev, M.L. SHit, YU.I. Kolpaklvichb D.I. Kozhokaru, V.G. Klejmenov. Problemy regional'noj energetiki. 2008;3:104-117.

20. Denicolai M., Hällström J. *A Self-balanced, Liquid Resistive, High Impedance HV Divider*. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering; 25-29 August 2005; Tsinghua University, Beijing, China; 2005. Paper J-05. Available at: <http://www.saunalahti.fi/dncmrc1/wprobe/wprobe.pdf>. Accessed to: 23 Oct 2020.

21. Yongdong Li, Qing-da Meng, Po, Yang Zheyuan Zhao, et al. Analysis on the Influence Factors of Capacitor Voltage Transformer Dielectric Loss Measurement. *Energy and Power Engineering*. 2013;5:1240-1242.

22. Vorob'eva EA. *Sovershenstvovanie printsipov vypolneniya adaptivnykh tokovykh i admitansnykh zashchit ot zamykanii na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6-10 kV*. Ivanovo; 2018. Available at: http://ispu.ru/files/Avtoreferat_Vorobea_E.A..pdf. Accessed: 23 Oct 2020.

23. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*. 1917. H. 37, 38.

24. Peters IE. Voltage Induced by Arcing Ground. *Tr. AIEE*. 1923. P. 478.

25. Belyakov NN. *Investigation of overvoltage at arc earth faults in 6 and 10 kV networks with isolated neutral*. *Electricity*, 1957;5:31-36.

26. Pyzhov V.K., Smirnov N.N. *Sistemy konditsionirovaniya, ventilyatsii i otopleniya*. Moskva, Vologda: Infra-Inzheneriya, 2019. P. 528.

27. Pogosyan Kh.P. *Vozdushnaya obolochka zemli*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1962. P. 291.

28. Shul'gin A.M. *Klimat pochvy i ego regulirovanie*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1967. P. 302.

29. Goryunov V. *Odnofaznoe zamykanie na zemlyu. Mozhno li reshit' problemu?* *Novosti elektrotehniki*. 2017. № 2 (104). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2017/104/04.php>. Accessed to: 22 Oct 2020.

30. Shuin V.A. *Zashchity ot zamykanii na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV*. M: NTF «Energoprogress», 2001. P. 104.

Authors of the publication

Elena E. Gotovkina – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia.

Andrey A. Yablokov – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia; Research and Production Association "Digital Measurement Transformers".

Nikolay N. Smirnov – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia.

© Е.Е. Готовкина, А.А. Яблоков, Н.Н. Смирнов, А.В. Панащатенко, В.Д. Лебедев, О.А. Добрягина

Anton V. Panashatenko – RPA «DMS» Ivanovo, Russia.

Vladimir D. Lebedev – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia; RPA «DMS» Ivanovo, Russia.

Olga A. Dobryagina – Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia.

Получено

17 февраля 2021г.

Отредактировано

03 марта 2021г.

Принято

04 марта 2021г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛА НАГРУЗКИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть наиболее актуальные и важные проблемы параллельной работы генераторных агрегатов в составе автономных электротехнических комплексов современных морских судов, таких как переход дизель-генераторных агрегатов в режим обратной мощности и существование обменных колебаний мощности при параллельной работе. Рассмотреть возможность совершенствования метода устранения обменных колебаний мощности с использованием карт зависимостей амплитуды колебаний от параметров дизель-генераторных агрегатов. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялась математическая модель автономного электротехнического комплекса, позволяющая учесть зазоры люфтов в контурах регулирования частоты вращения параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Построена карта зависимости угла нагрузки от зазоров люфта. Доказана полная идентичность карт зависимости угла нагрузки от зазоров люфта и карт зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта. В критерии определения значения амплитуды обменных колебаний мощности предложено использовать угол нагрузки генераторов вместо огибающих токов генераторов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование угла нагрузки параллельно работающих генераторов позволяет повысить быстродействие и точность блока устранения обменных колебаний мощности. Разработанный подход позволяет контролировать переход генераторных агрегатов в режим обратной мощности и появление обменных колебаний мощности на основе измерения углов нагрузки генераторов.

Ключевые слова: обменные колебания мощности, параллельная работа, автономный электротехнический комплекс, угол нагрузки, генераторный агрегат, экспериментальные исследования.

Для цитирования: Савенко А.Е., Савенко П.С. Использование угла нагрузки синхронных генераторов для устранения обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 197-207. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-197-207.

USE OF LOAD ANGLE OF SYNCHRONOUS GENERATORS TO ELIMINATE POWER EXCHANGE OSCILLATIONS IN AUTONOMOUS ELECTRICAL COMPLEXES

AE. Savenko, PS. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
Savenko-70@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Consider the most pressing and important problems of parallel operation of generator sets as part of autonomous electrical complexes of modern sea vessels, such as the transition of diesel generator sets to reverse power mode and the existence of power exchange oscillations during parallel operation. Consider the possibility of improving the method for eliminating power exchange oscillations using maps of dependences of the amplitude of oscillations on the parameters of diesel generator sets. METHODS. When solving the problem, a mathematical model of an autonomous electrical complex was used, which allows to take into account the backlash clearances in the control loops of the rotation frequency of

parallel diesel generator sets. **RESULTS.** A map of the dependence of the load angle on the backlash clearances was constructed. The complete identity of the maps of the dependence of the load angle on the backlash clearances and the maps of the dependence of the amplitude of the power exchange oscillations on the backlash gaps has been proved. In the criterion for determining the value of the amplitude of the power exchange oscillations, it is proposed to use the load angle of the generators instead of the envelope currents of the generators. **CONCLUSION.** The use of the load angle of parallel operating generators allows to increase the speed and accuracy of the unit for eliminating power exchange oscillations. The developed approach makes it possible to control the transition of generating sets to the reverse power mode and the appearance of power exchange oscillations based on measuring the load angles of the generators.

Keywords: power exchange oscillations, parallel operation, autonomous electric power complex, load angle, generating set, experimental research.

For citation: Savenko AE., Savenko PS. Use of load angle of synchronous generators to eliminate power exchange oscillations in autonomous electrical complexes *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1): 197-207. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-197-207.

Введение

Автономные электротехнические комплексы, имеющие в своем составе дизель-генераторные агрегаты, продолжают оставаться широко востребованными в различных областях деятельности человечества [1,2]. Не смотря на развитие и интеграцию в энергетические системы возобновляемых источников электроэнергии, дизель-генераторные установки являются наиболее надежными, универсальными и независимыми от внешних условий устройствами. Суда и плавучие объекты морского флота относятся к электротехническим комплексам, которые во время нахождения в море и океане могут получать электрическую энергию исключительно за счет собственных источников [3-6]. Конечно, в настоящее время существуют экспериментальные суда с солнечными батареями, дополнительным парусным вооружением, волновые электростанции. Однако, основными источниками электрической энергии на плавучих объектах морского флота, где не применяются атомные энергетические установки, продолжают оставаться дизель-генераторные устройства на основе синхронных генераторов в режиме их параллельной работы [7-10].

Весь мир знает и следил за строительством подводного газопровода «Турецкий поток» с Черноморского побережья Российской Федерации в Турцию, а теперь газопровода «Северный поток-2» с Балтийского побережья Российской Федерации в Западную Европу. Основную и наиболее значительную часть работ по прокладке трубопровода выполнило самое большое в практике мирового судостроения судно «*Pioneering Spirit*» («Дух первопроходца») водоизмещением порядка одного миллиона тонн (рис. 1). Судно находится в собственности швейцарской компании *Allseas*. «*Pioneering Spirit*» производит монтаж, транспортировку буровых платформ и прокладку подводных трубопроводов. Строительство судна осуществляла компания *Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering* (Южная Корея) на верфях Южной Кореи и в Роттердаме в 2011-2016 годах.

Примечателен тот факт, что президент Российской Федерации Владимир Владимирович Путин лично посетил судно «*Pioneering Spirit*» 23 июня 2017 года и присутствовал при соединении подводных частей трубопровода «Турецкий поток».

На судне установлены 12 винторулевых колонок типа Азипод мощностью по 4000 кВт. Электростанция судна состоит из 8 дизель-генераторов мощностью по 14700 кВт каждый, также установлен стояночный дизель-генератор мощностью 6100 кВт и аварийный дизель-генератор мощностью 3000 кВт. Генераторы вырабатывают напряжение 11кВ, что относится к классу High voltage. При такой колоссальной мощности автономной электростанции, на судне ощущается ее недостаток! Хотя, первоначально были установлены дизель-генераторы по 11200 кВт, но из-за недостатка электрической мощности при модернизации генераторы заменили, а дизелям увеличили обороты с 600 до 720 об/мин. На судне практически отсутствуют электрогидравлические приводы. Сейчас устанавливается полностью электрический, как и все остальные краны на судне, кормовой кран-спарка, грузоподъемностью 20 тысяч тонн. Суммарная мощность электродвигателей такого кормового крана составляет примерно 60 тысяч

кВт. Грузовые краны построены производителем тяжелого морского оборудования компанией *Huisman*.



Рис. 1. Судно «*Pioneering Spirit*»

Fig.1. Ship «*Pioneering Spirit*»

На судне «*Pioneering Spirit*» существует очень большая проблема, связанная с обратной мощностью. Так, даже кран на 5000 тонн вызывает переход всех генераторов в режим обратной мощности при спуске груза, вследствие чего автоматическая защита по превышению оборотов останавливает все дизеля. Процесс происходит чрезвычайно быстро, так как кран используется в режиме компенсации волнения моря и обеспечивает неподвижность вывешенной части трубопровода. При этом период качки составлял 11 сек, а ограничения по амплитуде волнения моря 3 м, таким образом кран чередует режимы травления и выбирания, каждый из которых длится 4-5 сек, а защита по обратной мощности настроена на срабатывание через 10 сек. Для выхода из такой аварийной ситуации, судоводительский персонал судна запускает пару аzipодов на полную мощность в противоположные стороны для обеспечения нагрузки на судовую электрическую сеть. При этом на 5000 тонном кране на основной гак работает 12 электромоторов по 600 кВт. Если судно стоит в порту или, например, на рейде при хороших погодных условиях и общая нагрузка маленькая, то, как только судоводители забудут запустить винторулевые колонки или крановщик не предупредит об опасном режиме работы крана, то судно сразу обесточивается, то есть происходит блэкаут со всеми вытекающими последствиями. Очевидно, что установка и использование электрического кормового крана на 20 тысяч тонн может вызвать непредсказуемые последствия для устойчивости в работе автономного судового электротехнического комплекса. В дополнение ко всем существующим проблемам, необходимо рассеять 60 МВт при спуске груза. Когда груз опускается краном, то все электромоторы переходят в режим генерации и эта энергия начинает заряжать конденсаторы на шине постоянного тока инверторов, при этом за 4-5 секунд происходит их заряд с 1100 В до 1200 В. При превышении напряжением предела в 1200 В, *AFE (active frond end)* выпрямитель переходит в режим инвертора ведомого сетью и выдает всю энергию в общую судовую сеть. Реально эта мощность настолько велика, что переводит все параллельно работающие дизель-генераторы в режим обратной мощности. Конечно, такая проблема существует у всех судовых кранов с электрическим приводом и всегда имеет место проблема, куда деть энергию при опускании груза, либо кабины лифта. Для решения такой задачи часто используют резисторы – ТЭНы, но в случае, когда это лифт с электромотором на 20 кВт или кран на 100 тонн с двумя электромоторами по 350 кВт, такие ТЭНы имеют реализуемые размеры и греют воду. В ситуации с электрическим краном грузоподъемностью 20 тысяч тонн на судне «*Pioneering Spirit*» экипаж имеет дело с мощностью в 100 раз большей и возникает проблема с рассеиванием этой энергии. Для выхода из сложившейся ситуации, планируется установка системы аккумуляторов на каждую общую шину постоянного тока параллельно конденсаторам инверторов в помещении каждой лебедки. По предварительным расчетам потребуется 4000 кВт*ч литий-титанатных аккумуляторных батарей. Это позволит опускать груз массой в 20 тысяч тонн со скоростью 10 см/сек на 50 метровую высоту.

При переходе синхронного генератора в режим обратной мощности происходит изменение его угла нагрузки, то есть угла между осью полюсов ротора самого генератора и осью его вращающегося магнитного поля. Устанавливаемые на судах системы автоматики позволяют отслеживать изменения угла нагрузки синхронных генераторов.

Как было установлено в ходе проведения исследований на судах морского флота, в автономных электротехнических комплексах возникают обменные колебания мощности при параллельной работе синхронных генераторов [11]. Такие колебания мощности крайне негативно сказываются на работе судового электрооборудования и средств автоматики и способны создавать аварийные ситуации вплоть до обесточивания судна. Остановка генерирующих электрическую энергию агрегатов является аварийной ситуацией и создает угрозу самому суду, жизни его экипажа и пассажиров. Конечно, квалификация судовых специалистов позволяет в большинстве случаев восстановить электроснабжение и продолжить плавание.

Материалы и методы

Используя разработанную математическую модель (рис. 2) автономного электротехнического комплекса судна, установлено, что причиной обменных колебаний мощности является люфт в контурах управления скоростью дизель-генераторов [12]. Кроме того, разработан метод устранения обменных колебаний мощности [11, 13], для реализации которого предложены изменения в структуре судового электротехнического комплекса, алгоритм работы вводимого нового блока, а также критерий распознавания системой уровня колебаний [11, 14].

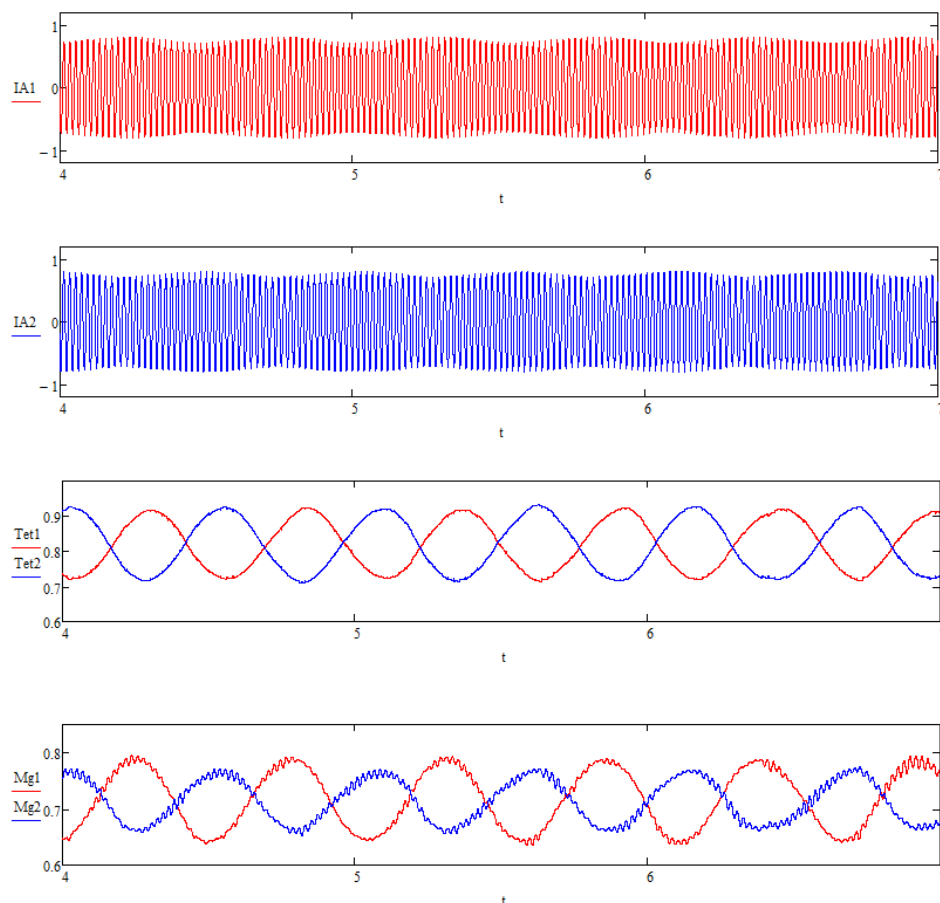


Рис.2. Результаты моделирования. Зазоры люфта $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, коэффициенты передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставки по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянные времени

$$T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 60$$

Fig.2. Simulation results. Backlash gaps $D_{n1}=0.002$ and $D_{n2}=0.01$, transmission coefficients, speed settings and time constants

Основными параметрами, по которым проводится анализ амплитуды обменных колебаний мощности в разработанном методе являются токи генераторов. Вместе с тем в используемой математической модели судового электротехнического комплекса [11, 15] присутствует информация о мгновенных углах нагрузки параллельно работающим

синхронных генераторов (рис. 1). Графики мгновенных значений токов, углов нагрузки и моментов двух генераторных агрегатов, работающих параллельно, представлены в квазиустановившемся режиме работы в диапазоне 4-7 сек., при этом заданы значения зазоров люфтов контуров регулирования частоты вращения соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, коэффициенты передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставки по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянные времени $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 60$.

На графиках токов генераторов отчетливо видны признаки обменных колебаний мощности, когда максимуму огибающей тока одного генератора соответствует минимум огибающей тока второго параллельно работающего генератора и наоборот. При сопоставлении графиков изменения токов и углов нагрузок генераторов видна полная идентичность огибающих токов и графиков углов нагрузки, максимуму линии изменения угла нагрузки первого генератора соответствует минимум линии изменения угла нагрузки

второго параллельно работающего генератора. Таким образом, можно определять и контролировать амплитуду обменных колебаний мощности по углам нагрузки параллельно работающих генераторов.

Результаты

Для выяснения характера зависимости угла нагрузки синхронных генераторов от значений зазоров люфта в контурах регулирования частотой вращения проведены исследования при помощи разработанной математической модели [11]. Изменения зазоров принимались в диапазоне от 0 до 0,02 с шагом 0,002, то есть во всем диапазоне устойчивой работы. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость угла нагрузки от зазоров люфта в контурах регулирования частоты вращения генераторных агрегатов

Dn1/Dn2	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02
0	0	0,05	0,09	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,41	0,46
0,002	0,05	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,34	0,38	0,42
0,004	0,1	0,06	0,02	0,05	0,11	0,14	0,2	0,25	0,29	0,33	0,38
0,006	0,15	0,11	0,06	0,02	0,05	0,11	0,15	0,2	0,24	0,3	0,34
0,008	0,2	0,16	0,11	0,06	0,02	0,06	0,09	0,15	0,19	0,23	0,28
0,01	0,25	0,21	0,16	0,11	0,06	0,02	0,05	0,1	0,14	0,19	0,24
0,012	0,31	0,27	0,21	0,16	0,11	0,06	0,02	0,05	0,09	0,14	0,19
0,014	0,36	0,32	0,26	0,21	0,16	0,12	0,07	0,03	0,05	0,09	0,15
0,016	0,42	0,38	0,31	0,26	0,21	0,16	0,11	0,08	0,04	0,05	0,1
0,018	0,48	0,43	0,36	0,32	0,26	0,21	0,17	0,12	0,08	0,05	0,06
0,02	0,54	0,48	0,41	0,37	0,31	0,26	0,21	0,17	0,13	0,08	0,06

по которым построена карта зависимости угла нагрузки от зазоров люфта в контурах регулирования частоты вращения генераторных агрегатов (рис. 3).

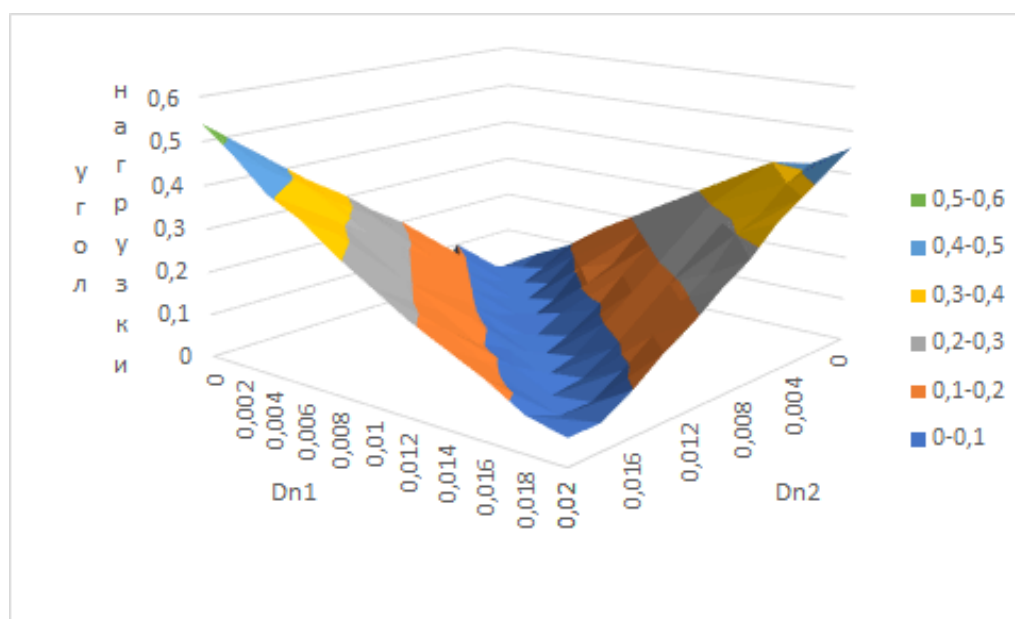


Рис. 3. Карта зависимости угла нагрузки от зазоров люфта. D_{n1} и D_{n2} — зазоры люфта первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Fig.3. Map of the dependence of the load angle on the backlash gaps. D_{n1} and D_{n2} are the backlash gaps of the first and second parallel-running diesel generator, respectively

Ранее, проведены аналогичные исследования на предмет выяснения зависимости амплитуд обменных колебаний мощности от зазоров люфта по значениям токов генераторов [12]. Результаты таких вычислений приведены в таблице 2, по которым построена карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта (рис. 4).

Таблица 2

Зависимость амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта

D_{n1}/D_{n2}	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02
0	0	0,011	0,021	0,031	0,04	0,052	0,065	0,071	0,083	0,095	0,1
0,002	0,01	0,0015	0,011	0,021	0,033	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09	0,1
0,004	0,02	0,01	0,002	0,012	0,021	0,035	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09
0,006	0,028	0,018	0,007	0,003	0,013	0,024	0,034	0,048	0,057	0,07	0,081
0,008	0,04	0,03	0,02	0,0065	0,0025	0,0135	0,024	0,036	0,048	0,058	0,068
0,01	0,05	0,04	0,03	0,018	0,0075	0,0062	0,0145	0,024	0,039	0,048	0,058
0,012	0,065	0,051	0,038	0,028	0,0165	0,007	0,004	0,015	0,025	0,038	0,048
0,014	0,075	0,063	0,052	0,04	0,028	0,015	0,006	0,004	0,015	0,027	0,039
0,016	0,09	0,08	0,063	0,051	0,04	0,0255	0,015	0,0045	0,006	0,015	0,027
0,018	0,1	0,09	0,075	0,06	0,051	0,036	0,027	0,015	0,045	0,0075	0,015
0,02	0,117	0,1	0,086	0,075	0,062	0,05	0,04	0,027	0,015	0,006	0,0065

Сравнение результатов исследования, приведенных в таблицах 1 и 2, а также карт зависимости угла нагрузки от зазоров люфта на рисунке 2 и карты зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта на рисунке 3 показывает их полное сходство и идентичность. Таким образом, обе карты доказывают то, что при равенстве зазоров или нулевых значениях зазоров люфта в контурах регулирования оборотов дизель-генераторов обменные колебания отсутствуют, а увеличение значений зазоров D_{n1} и D_{n2} приводит к росту амплитуды обменных колебаний мощности.

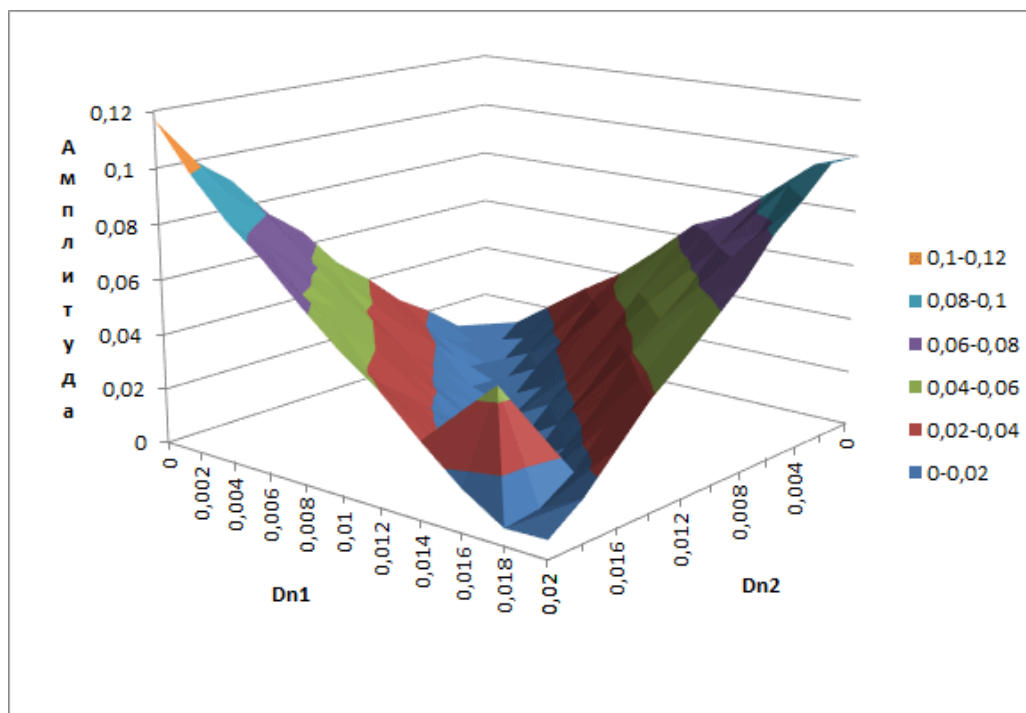


Рис.4. Карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта. D_{n1} и D_{n2} - зазоры люфта первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Fig.4. Map of the dependence of the amplitude of the power exchange fluctuations on the backlash gaps. D_{n1} and D_{n2} -backlash gaps of the first and second parallel-running diesel generator, respectively

Обсуждение

Рассмотренные проблемы перехода генераторов в режим обратной мощности и существование обменных колебаний мощности в автономных судовых электротехнических комплексах настолько серьезны, что без преувеличения, требуют поиска новых путей решения. Полученные результаты исследований дают возможность единого подхода при решении поставленных задач. Такой подход возможен с точки зрения контроля угла нагрузки синхронных генераторов и использования системами автоматического управления параллельной работой генераторных агрегатов информации об изменении угла нагрузки. В разработанном методе устранения обменных колебаний мощности [11] при определении критерия о значении таких колебаний используются огибающие токов синхронных генераторов I_1 и I_2 , из разности которых $I_1 - I_2$ формируется значение $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ за период времени T (рис.5). Значение суммарной площади S является индикатором значения амплитуды обменных колебаний мощности.

При формировании формы огибающей используется синусоида мгновенного значения тока генератора (рис. 6). Это требует временных затрат, что сказывается на быстродействии системы. Кроме того, возможно возникновение некоторых сложностей при построении огибающих токов, связанных с не идеальностью форм токовых синусоид. Как уже отмечалось, переход генераторов в режим обратной мощности на судне «*Pioneering Spirit*» происходит очень быстро, менее, чем за 4-5 сек., поэтому повышение быстродействия имеет чрезвычайно важное значение и может значительно улучшить характеристики устойчивой работы электротехнического комплекса судна.

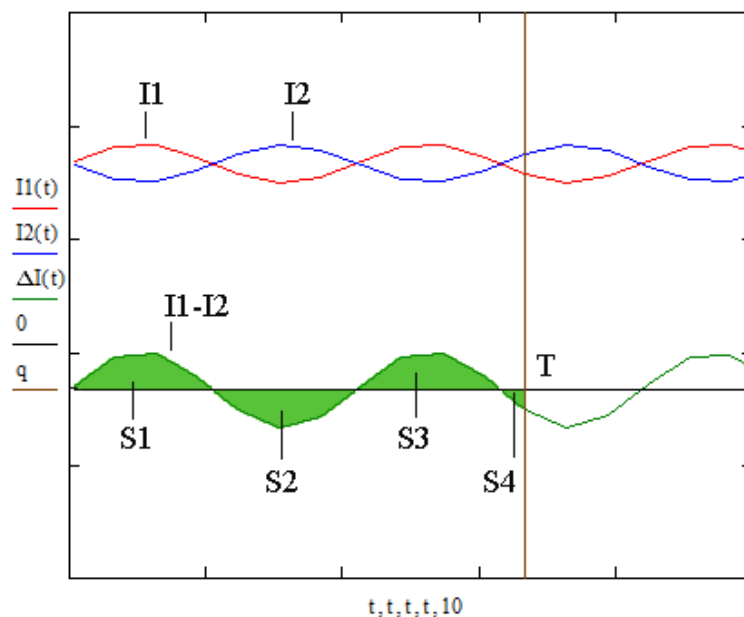


Рис.5. Критерий определения амплитуды обменных колебаний мощности на основе токов двух генераторов

Fig.5. Criterion for determining the amplitude of the power exchange fluctuations based on the currents of two generators

Во время проведения исследований на морских судах фиксировались случайные отклонения амплитуд токовых синусоид в отдельных периодах, что было связано, например, с появлением значительных пульсаций при работе мощных тиристорных преобразователей напряжения гребных электрических двигателей, а также с возможным появлением синфазных колебаний мощности из-за разницы в настройках регуляторов частоты [11]. Такие явления требуют специальных мер и сказываются на точности формирования массива данных для построения огибающей тока генератора и работе блока устранения обменных колебаний мощности в целом в реальных судовых условиях, которые естественно отличаются от идеальных условий математического моделирования.

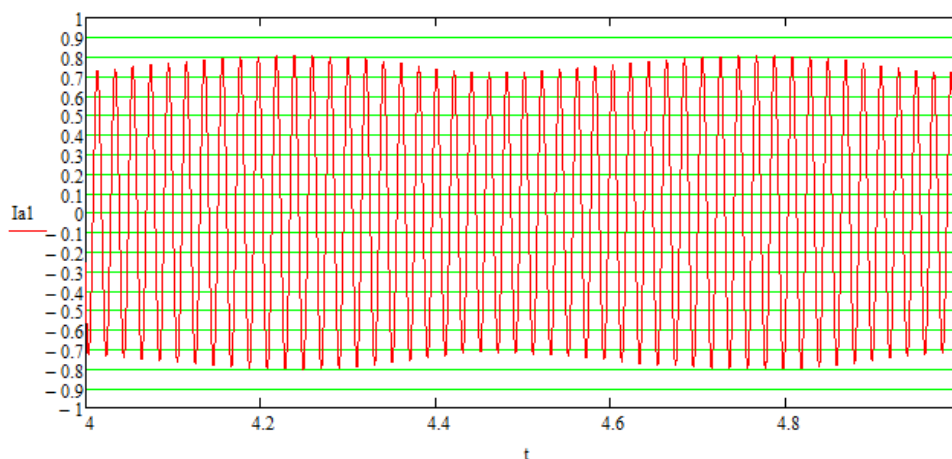


Рис.6. Результаты моделирования. График тока одного из параллельно работающих синхронных генераторов, $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$

Fig.6. Simulation results. Graph of the current of one of the parallel synchronous generators, $D_{n1}=0.002$ and $D_{n2}=0.01$

При использовании блоком устранения обменных колебаний мощности критерия определения значения амплитуды обменных колебаний мощности целесообразно заменить огибающие токов генераторов, полученные из графика мгновенных значений токов генераторов (рис.6), на линию угла нагрузки генераторов (рис. 7). Такая линия строится по данным, полученным непосредственно из систем автоматики, контролирующим переход в режим обратной мощности и превышение амплитудой

обменных колебаний мощности предельно допустимых значений.

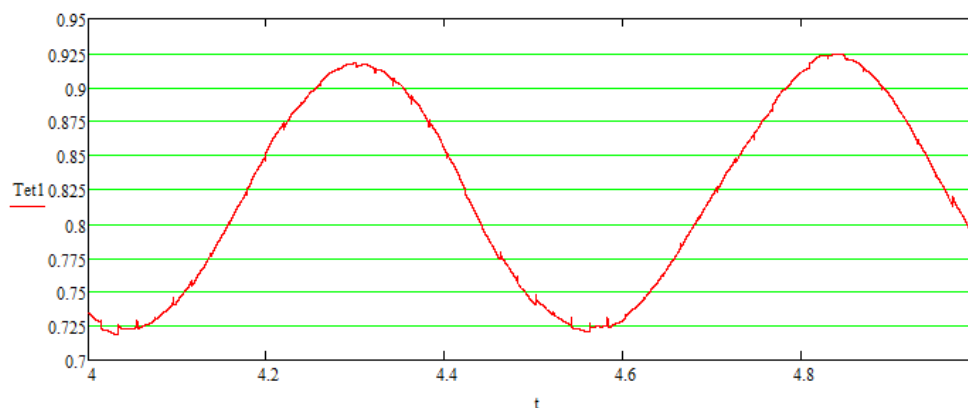


Рис.7. Результаты моделирования. График угла нагрузки одного из параллельно работающих синхронных генераторов, $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$

Fig.7. Simulation results. Graph of the load angle of one of the parallel synchronous generators, $D_{n1}=0,002$ and $D_{n2}=0,01$

После такой замены критерий определения амплитуды обменных колебаний для двух параллельно работающих генераторов примет вид, изображенный на рисунке 8. Имея готовые кривые изменения углов нагрузки параллельно работающих генераторов θ_1 и θ_2 , строится кривая их разности $\theta_1 - \theta_2$ и определяется $S=S_1+S_2+\dots+S_n$ за период времени T , по которой и определяется амплитуда обменных колебаний мощности.

В случае параллельной работы произвольного количества синхронных генераторов [11] также может быть применен критерий с использованием угла нагрузки.

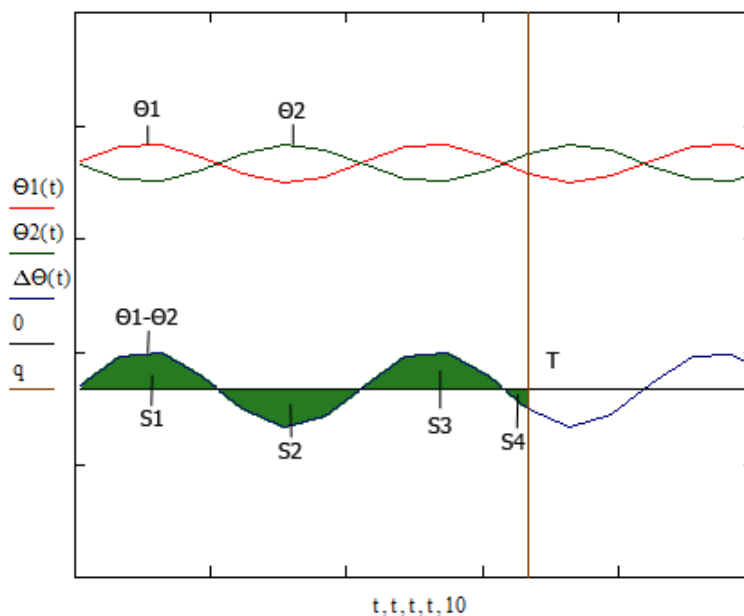


Рис.8. Критерий определения амплитуды обменных колебаний мощности на основе углов нагрузки двух генераторов

Fig.8. Criterion for determining the amplitude of power exchange fluctuations based on the load angles of two generators

Закключение

Таким образом, представлена актуальная информация о проблемах, возникающих в автономных электротехнических комплексах морских судов при параллельной работе синхронных генераторов. Проведенные исследования позволяют внести изменения в метод устранения обменных колебаний мощности с целью улучшения быстродействия и точности работы системы, а также для формирования единого подхода в управлении углами нагрузки параллельно работающих генераторов. Для контроля и устранения обменных колебаний мощности получена карта зависимости угла нагрузки генератора от

зазоров люфта, вызывающих такие колебания. Сравнительный анализ карт зависимости токов генераторов от зазоров люфта и карт зависимости углов нагрузки от зазоров люфта показал их полную идентичность с точки зрения значений амплитуд обменных колебаний мощности.

Литература

1. Грачева Е.И., Ильясов И.И., Алимова А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 3-4. С. 62-71.
2. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В и др. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109-114.
3. Khvatov O.S., Kobyakov D.S. Increasing the Efficiency of a Diesel-Generator Power Plant. Russian Electrical Engineering, 2020. 91(12). С. 742–748.
4. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., et al. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
5. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., et al. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5):253-258.
6. Губанов Ю.А., Калинин И.М., Корнев А.С., и др. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), С. 103–109.
7. Zhu, Sipeng, Ma Zetai, Zhang, Kun, et al. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy. 2020. Т. 210. №118558.
8. Zhu Sipeng, Zhang Kun, Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews 2020.Т. 120. № 109611.
9. Geertsma R.D., Visser, K., Negenborn R.R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. Applied energy. 2018. Т. 228. С. 2490-2509
10. Mondejar, M.E., Andreasen, J.G., Pierobon, L., et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renewable & sustainable energy reviews. 2018. Т. 91. №126-151.
11. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах // Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново, 2016. 172 с.
12. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6. С. 46-54.
13. Savenko A.E. Development of Method for Eliminating Exchangeable Power Fluctuations in Shipboard Electrical Systems. Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019.С. 234-238.
14. Tyutikov V.V., Panteleev E.R., Zhilnikova Y.F. Analysing impact of transfer function zeros in controlled object on parametric sensitivity of systems synthesized by method of aggregated controller analytical design (ACAD). Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, 2020, 9111877.
15. Алейников А.В., Голубев А.Н., Мартынов В.А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. 2017. №. 5. С. 37-43.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета. г. Керчь. Email:Savenko-70@mail.ru.

Савенко Павел Станиславович – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. Gracheva EI, Il'jasov I, Alimova AN. The comparative analysis and research of methods of calculation of losses of the electric power in the systems of electrical power supply of the industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(3-4):62-71.
2. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV. Measuring-diagnostic complex for the diagnosis of power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2014;3-4:109-114.
3. Khvatov O.S., Kobayakov D.S. Increasing the Efficiency of a Diesel-Generator Power Plant. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(12):742-748.
4. Dar'Enkov AB, Samoyavchev I, Khvatov OS, et al. *Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion*. MATEC Web of Conferences, 2017;108:14002.
5. Sen'kov AP, Dmitriev BF, Kalmykov AN, et al. Ship unified electric-power systems. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(5):253-258.
6. Gubanov YA, Kalinin IM, Kornev AS, et al. Directions of improvement for ship unified power systems. *Marine Intelligent Technology*. 2019;1-1(43):103-109.
7. Zhu Sipeng, Ma Zetai, Zhang Ku, et al. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. *Energy*. 2020;210:118558. doi: 10.1016/j.energy.2020.118558.
8. Zhu Sipeng, Zhang Kun, Deng Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2020;120:109611. doi: 10.1016/j.rser.2019.109611.
9. Geertsma RD, Visser K, Negenborn RR. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. *Applied energy*. 2018;228:2490-2509. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080
10. Mondejar ME, Andreasen JG, Pierobon L, et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. *Renewable & sustainable energy reviews*. Book: 91. 2018;91:126-151. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
11. Savenko AE, Golubev AN. *Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes*. Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina. Ivanovo, 2016. 172 p.
12. Savenko AE, Savenko PS. Influence of backlash on amplitude of exchange power fluctuations in autonomous electric power equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(5-6):46-54.
13. Savenko AE. *Development of Method for Eliminating Exchangeable Power Fluctuations in Shipboard Electrical Systems*. Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019;2:234-238.
14. Tyutikov VV, Panteleev ER, Zhilnikova YF. *Analysing impact of transfer function zeros in controlled object on parametric sensitivity of systems synthesized by method of aggregated controller analytical design (ACAD)*. Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, 2020, 9111877.
15. Aleynikov AV, Golubev AN, Martynov VA. Development of a mathematical model of synchronous permanent magnet motor for real-time calculations. *Vestnik IGEU*. 2017;5:37-43.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko – Kerch State Maritime Technological University. Savenko-70@mail.ru

Pavel S. Savenko – Kerch State Maritime Technological University.

Получено

27 февраля 2021г.

Отредактировано

05 марта 2021г.

Принято

05 марта 2021г.

Сдано в набор 25.12.2020
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати 12.04.2021
Усл. печ. л. 12,6
Заказ № 5223
Дата выхода в свет апрель 2021

Формат 70x108/16.
Уч.изд. л. 10,02.
Цена свободная