

НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИКИ



Том 12 №1 2019

Safety & Reliability of Power Industry

В номере:

- О балансовой надежности электро-энергетических систем
- Непроектные режимы систем пароснабжения
- Диагностические измерения на высоко-вольтовых трансформаторах
- Система плазменного розжига на энергетических котлах
- Процессы теплопередачи на капиллярно-пористых покрытиях в энергоустановках
- Характеристики релейной защиты при периодических проверках
- Замена водяного отопления с использованием тепловых насосов

www.sigma08.ru
www.testenergo.ru



Тренажер ПГУ-450

Фирма АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (АО «ТЭСТ») разработала и внедрила компьютерный тренажерно-аналитический комплекс энергоблока ПГУ-450 МВт с АСУТП Siemens на базе ПТК SPRA-T3000 для Южной ТЭЦ ТГК-1 ОАО «Газпром энергохолдинг».

Тренажер ПГУ-450
прошел
научно-техническую
экспертизу и
государственную
регистрацию в
Федеральной службе по
интеллектуальной
собственности, патентам
и товарным знакам.

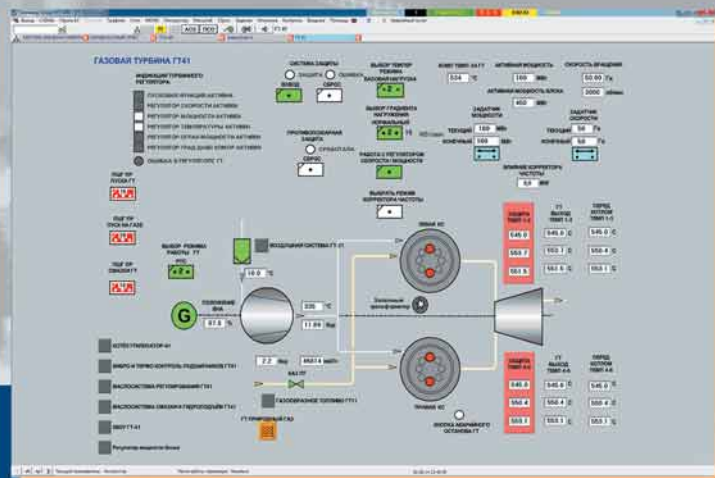
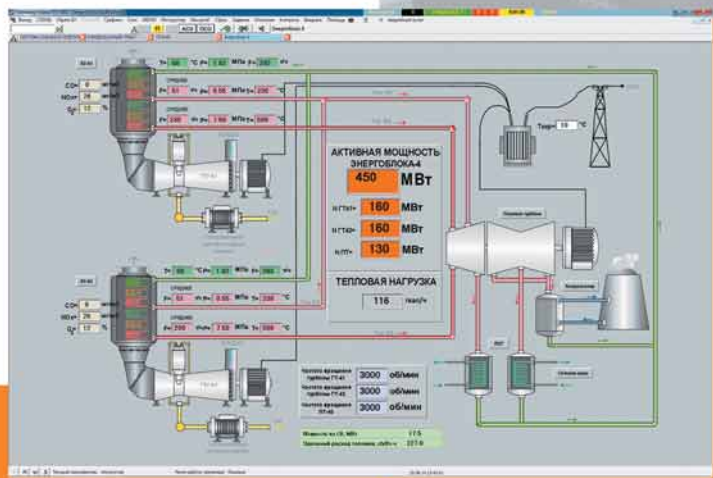
Тренажер ПГУ-450
может применяться
для подготовки
оперативного персонала
на тепловых
электрических станциях,
в учебных центрах,
высших и средних
учебных
заведениях.

Состав ПГУ-450 МВт

- две газотурбинные установки типа ГТЭ160
 - два котла-утилизатора П-96
 - одна паротурбинная установка теплофикационного типа Т-125-150-7,7
 - два генератора ТЗФГ-160-2МУ3
 - генератор ТЗФП-160-2МУ3
- Номинальная мощность блока 450 МВт
Тепловая мощность 341 Гкал/час
Топливо – природный газ

Состав тренажера ПГУ-450

- активные динамические мнемосхемы 136 шт
- всережимная физическая модель блока (включая электрическую часть)
- модель АСУТП (модель защит, блокировок, сигнализаций, пошаговых программ, АВР)
- развитая конфигурация сети
- пульт инструктора
- комплект аварийных ситуаций
- контролирующая программа
- комплект автоматизированных сценариев тренировок с оценкой
- сценарии для работы по диспетчерскому графику с оценкой
- определение технико-экономических показателей энергоблока
- графопостроение
- масштабирование времени
- сохранение режимов
- система поддержки оператора
- протоколы: действий оператора, ошибок, сигнализации, защит, блокировок



АО «Тренажеры
электрических станций
и сетей»:

117587, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 125 Ж, корп. 6
Тел. (495) 665-76-00, факс (495) 382-79-74
e-mail: magid@testenergo.ru, www.testenergo.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

С. И. МАГИД — д. т. н., профессор, генеральный директор АО «Тренажеры электрических станций и сетей», директор Департамента «Технические обучающие системы в энергетических технологиях» TEST UNESCO (Москва, Россия)

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Е. Н. АРХИПОВА — д. т. н., технический директор АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (Москва, Россия)

В. В. КУЛИЧИХИН — д. т. н., профессор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

РЕДАКТОРЫ РАЗДЕЛОВ

Н. И. ВОРОПАЙ — чл.-корр. РАН, д. т. н., профессор, научный руководитель ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) (Иркутск, Россия) — раздел «Общие вопросы надежности и безопасности энергетики»

В. И. ШАРАПОВ (д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (Ульяновск, Россия) — раздел «Генерация электроэнергии и тепла»

Л. А. ХОМЕНОК (д. т. н., профессор, заведующий аналитическим отделом Научно-производственного объединения по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова (ЦКТИ) (Санкт-Петербург, Россия) — раздел «Проектирование, исследования, расчеты»

Н. Д. ЧИЧИРОВА (действительный член Российской академии естественных наук, д. х. н., профессор, директор института теплоэнергетики, зав. кафедрой «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (Казань, Россия) — раздел «Эксплуатация электрических станций»

В. СТРИЕЛКОВСКИ (доктор философии, профессор, научный сотрудник Кембриджской бизнес-школы Кембриджского университета (Англия) — раздел «Электрогенерация зарубежных стран»

И. Г. АХМЕТОВА (д. т. н., доцент, директор института цифровых технологий и экономики ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (Казань, Россия) — раздел «Цифровые технологии и экономика»

Н. Н. ШВЕЦ (д. э. н., профессор, зав. кафедрой «Мировая электроэнергетика» МГИМО МИД России) — раздел «Энергетические аспекты международных отношений»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. Н. ВИВЧАР — к. г. н., советник Директора ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики» (Москва, Россия)

Е. П. ГРАБЧАК — Директор Департамента оперативного контроля и управления в электроэнергетике Министерства энергетики Российской Федерации (Москва, Россия)

Х. С. ДРАТАНЧЕВ — профессор Технического университета (Варна, Болгария)

И. Ш. ЗАГРЕТДИНОВ — к. т. н., генеральный директор АО «Институт Теплоэлектропроект» (Москва, Россия)

З. ЗИМОН — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой Бранденбургского Технического Университета (Котбус-Зенфтенберг, Германия)

Н. А. ЗРОЙЧИКОВ — д. т. н., профессор, заместитель директора по научной работе ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН») (Москва, Россия)

М. Х. Т. ИБРАГИМОВ — д. т. н., профессор, Первый заместитель председателя НП «Техноэкспо» (Москва, Россия)

Н. Б. КАРНИЦКИЙ — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

С. А. КРОПАЧЕВ — д. и. н., начальник Учебно-тренировочного центра АО «Мособлэнерго» (Москва, Россия)

Б. М. ЛАРИН — д. т. н., профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» (Иваново, Россия)

М. Ю. ЛЬВОВ — д. т. н., советник генерального директора АО «Объединенная энергетическая компания» (Москва, Россия)

М. Е. МАРЧЕНКО — к. т. н., генеральный директор ООО «Энив» (Москва, Россия)

В. Е. МЕССЕРЛЕ — д. т. н., профессор, главный научный сотрудник НИИ экспериментальной и теоретической физики Казахского Национального Университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан)

С. В. МИЩЕРЯКОВ — д. э. н., к. т. н., Генеральный директор Некоммерческого Партнерства «Корпоративный образовательный и

научный центр Единой энергетической системы» (Москва, Россия)

Д. МОРВА — доктор, профессор Будапештского политехнического университета (Будапешт, Венгрия)

Л. П. МУЗЫКА — к. т. н., доцент, директор ООО «Ресурс-персонал» (Омск, Россия)

А. Н. НАЗАРЫЧЕВ — д. т. н., профессор, ректор ФГАУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» (Санкт-Петербург, Россия)

В. А. НЕПОМНЯЩИЙ — академик Российской академии естественных наук, д. э. н., профессор, к. т. н. (Санкт-Петербург, Россия)

М. М. ПЧЕЛИН — Государственный советник РФ 1-го класса в отставке, лауреат премии Совета Министров СССР (Москва, Россия)

Н. Д. РОГАЛЕВ — д. т. н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», председатель Ученого совета (Москва, Россия)

А. И. ТАДЖИБАЕВ — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Диагностика энергетического оборудования» ФГАУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» (Санкт-Петербург, Россия)

А. Е. УЖАНОВ — к. с. н., доцент кафедры «Мировая электроэнергетика» Международного института энергетической политики и дипломата МГИМО МИД России, член-корреспондент Академии военных наук (Москва, Россия)

К. ФРАНА — д. т. н., профессор, заместитель декана факультета «Машиностроение» Технического университета (г. Либерец, Чехия)

М. И. ЧИЧИНСКИЙ — к. т. н., Генеральный инспектор — начальник Департамента технического надзора и аудита ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ПАО «ФСК ЕЭС») (Москва, Россия)

А. Я. ШЕЛГИНСКИЙ — д. т. н., профессор кафедры «Промышленные теплоэнергетические системы», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

Учредитель и издатель: Научно-производственное объединение «Энергобезопасность».

Периодичность издания четыре раза в год. Выходит с 2008 года.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия. Свидетельство ПИ № ФС77-31974 от 14 мая 2008 г.

Журнал включен в новый перечень ВАК Министерства образования и науки РФ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней, а также в базы данных: РИНЦ, ВИНТИ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory.

Журнал ассоциирован при Международном центре обучающих систем ЮНЕСКО и Международной кафедре-сети ЮНЕСКО «TVET». Полнотекстовые версии статей размещены в научной электронной библиотеке elibrary.ru.

Подписные индексы:

45024 — Объединенный каталог и интернет-каталог «Пресса России», Е45024 — Интернет-каталог «Книга-сервис».

Художественный редактор: — Маланьин Д. Б.

Технический редактор — Кутыко Н. Е.

Подписано в печать 29.03.2019 г. Отпечатано в ООО «Паритет».

Почтовый адрес редакции: 117587, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 125 Ж, корп. 6, ООО «НПО «Энергобезопасность»

Телефон: +7 495 665-76-00, телефон/факс: +7 495 382-79-74; e-mail: sigma08@sigma08.ru; www.sigma08.ru

© ООО «НПО «Энергобезопасность», «Надежность и безопасность энергетики»

EDITOR-IN-CHIEF

Sergey I. MAGID — Dr. of Tech. Sc., Professor, Director General, JSC «Simulators of power plants and networks», Director of the Department «Technical educational systems in energy technologies» TEST UNESCO (Moscow, Russia).

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Elena N. ARKHIPOVA — Dr. of Tech. Sc., Technical Director, JSC «Simulators of power plants and networks» (Moscow, Russia)

Vladimir V. KULICHIKHIN — Dr. of Tech. Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)

SECTION EDITORS:

Nikolay I. VOROPAI — Corr. Member of the RAS, Dr. of Tech. Sc., Professor, Scientific Director of the Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia) — section «General issues of safety and reliability of power industry»

Vladimir I. SHARAPOV — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the Department of heat and gas supply and ventilation of the «Ulyanovsk State Technical University» (Ulyanovsk, Russia) — section «Electric power and heat generation»

Leonid A. KHOMENOK — Dr. of Tech. Sc., Professor, The head of analytical Department I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment (St. Petersburg, Russia) — section «Design, research, calculations»

Nataliya D. CHICHIROVA — full member of the Russian Academy of Natural Sciences, Dr. of Chem. Sc., Professor, Director of the Thermal Engineering Institute, head of the Department of thermal power plants of the «Kazan State Power Engineering University» (Kazan, Russia) — section «Operation of power plants»

Wadim STRIELKOWSKI — Ph.D., University of Cambridge, Judge Business School (Cambridge, England) — section «Power generation in foreign countries»

Irina G. AKHMETOVA — Dr. Eng., Associate Professor, Director of the Institute of Economics and Information Technologies, FSBEI of Higher Education Kazan State Power Engineering University (Kazan, Russia) — section «Digital technologies and economy»

Nikolay N. SHVETS (PhD (Ec.)), Professor, Head of the World Electric Power Industry Department, MGIMO University of the Russian Federation Ministry of Foreign Affairs) — section Energy Related Aspects of International Relations

EDITORIAL BOARD

Anton N. VIVCHAR — Cand. of Geogr. Sc., Advisor of Director of Federal State Autonomous Institution Research Institute «Environmental Industrial Policy Centre»

Hristo S. DRAGANICHEV — Professor of the Varna Technical University (Varna, Bulgaria)

Evgeny P. GRABCHAK — Director of the Department for Operational Control and Management in the Electric Power Industry of the Ministry of Energy of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Ilyas Sh. ZAGRETDINOV — Cand. Sc. (Eng), Director of JSC «Institute Teploelectroproject» (Moscow, Russia)

Sylvio SIMON — Prof. Dr.-Ing., Brandenburg University of Technology (Cottbus-Senftenberg, Germany)

Nikolay A. ZROICHKOV — Dr. of Tech. Sc., Professor, «G. M. Krzhizhanovskiy Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)

Marat H. G. IBRAGIMOV — Dr. of Tech. Sc., Professor, First Deputy Chairman, NP «Tekhnoksp» (Moscow, Russia)

Nikolay B. KARNITSKIY — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the department of thermal power plants, the Belarus National Technical University (Minsk, Belarus)

Sergey A. KROPACHEV — Dr. of Hist. Sc., Head of Training Centre of JSC Mosoblenergo (Moscow, Russia)

Boris M. LARIN — Dr. of Tech. Sc., Professor, Department of chemistry and chemical technology in the power industry, of the «Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin» (Ivanovo, Russia)

Mikhail Yu. LVOV — Dr. of Tech. Sc., Adviser to the General Director of United Energy Company JSC (Moscow, Russia)

Mikhail E. MARCHENKO — Cand. of Tech. Sc., Director, «Eniv», LLC (Moscow, Russia)

Vladimir E. MESSERLE — Dr. of Tech. Sc., Professor, Head Research Fellow of the Research institute of experimental and theoretical physics, the al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)

Sergey V. MISHCHERYAKOV — Dr. of Econ. Sc., Cand. of Tech. Sc., Director General of the Non-profit Partnership «Corporate Training

and Scientific Center of the Unified Energy System» (Moscow, Russia)

George MORVA — Sc. Dr., Professor, the Budapest Polytechnic University (Budapest, Hungary)

Leonid P. MUZYKA — Cand. of Tech. Sc., Director, «Resurs-Personal», LLC (Omsk, Russia)

Aleksandr N. NAZARYCHEV — Dr. of Tech. Sc., Professor, Rector of the «Peterburg power engineering institute of professional development» (St. Petersburg, Russia)

Vladimir A. NEPOMNYASHCHIIY — Academician of the RANS, Dr. of Econ. Sc., Professor, Cand. of Tech. Sc. (St. Petersburg, Russia)

Mikhail M. PCHELIN — Class I State Councilor of the RF (retired), awardee of the Prize of the Council of Ministers of the USSR (Moscow, Russia)

Nikolay D. ROGALEV — Dr. of Tech. Sc., Professor, Rector of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Chairman of the Academic Council (Moscow, Russia)

Aleksey I. TADZHIBAYEV — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the Department of diagnostics of energy systems, «Peterburg power engineering institute of professional development» (St. Petersburg, Russia)

Aleksandr E. UZHANOV — Cand. of Sociol. Sc., Associate Professor of World Power Industry Department, International Institute of Energy Policy and Diplomacy, MGIMO of the Russian Federation Foreign Ministry, associate member of the Academy of Military Sciences (Moscow, Russia)

Karel FRANA — Prof. Dr. — Ing. habil, Technical University of Liberec (Liberec, Czech Republic)

Mikhail I. CHICHINSKIY — Cand. of Tech. Sc., Inspector General/Head of the Department of technical supervision and audit, PJSC «Federal Grid Company of the Unified Energy System» (Moscow, Russia)

Aleksandr Y. SHELGINSKY — Dr. of Tech. Sc., Professor of Heat Power Industry Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia).

Founder and publisher: Scientific and Production Association «Energobezопасnost». Frequency of the edition four times a year. Leaves since 2008.

The journal is registered in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communication, Communications and the Protection of Cultural Heritage. Certificate ПИИ № ФЧ77-31974 dated May 14, 2008.

The journal is included into the SCADT's List of major reviewed scientific journals and publications, which shall publish the key scientific findings of theses for academic degrees of Doctor and Candidate of Sciences. The Journal is included in the following databases: RINC, VINITI, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory.

The journal is associated with the UNESCO International Center of Training Systems and the UNESCO International Chair Network «TVET».

Artistic editor: Malanin D. B. Technical Editor: Kutko N. E. Signed in the press on March 29, 2019. Printed in LLC Paritet.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

Беляев Н. А., Егоров А. Е., Коровкин Н. В., Чудный В. С. Экономические аспекты обеспечения балансовой надежности электроэнергетических систем.....	4
Киселева А. И., Фокин А. М. Комплексный подход к оценке влияния непроектных режимов на работу систем пароснабжения.....	10
Тихонов В. А. О влиянии периодичности диагностических измерений на повышение надёжности высоковольтных трансформаторов	18

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

Михайлов В. Е., Колпаков С. П., Хоменок Л. А., Шестаков Н. С. О перспективе внедрения систем плазменного розжига на энергетических котлах.....	22
Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я. Обобщение процессов теплопередачи и их сравнительная оценка для капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках	29
Зеленцов Б. П., Трофимов А. С. Исследование эксплуатационных характеристик системы релейной защиты в условиях регулярных периодических проверок.....	36
Мартынов А. В., Кутко Н. Е. Целесообразность замены водяного отопления на воздушное с использованием тепловых насосов	45
Лаптев А. Г., Фарахов Т. М., Башаров М. М. Определение эффективности очистки газов от дисперсной фазы и модернизация скрубберов высокоэффективными насадками	50
Недосекин А. О., Смирнов А. В., Макаренко Д. П., Абдулаева З. И. Функционально-эксплуатационный риск как критерий для оценки долговечности автономной энергетической системы	56

ДИСКУССИИ

Музыка Р. Р. Об одной ошибке в «Методике осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя»	63
--	----

ИНФОРМАЦИЯ	65
-------------------------	----

ХРОНИКА, ПУБЛИКАЦИИ	72
----------------------------------	----

ПЕСТРЫЙ МИР: ФАКТЫ, МНЕНИЯ, МЕТАФОРИЗМЫ	79
--	----

CONTENTS

GENERAL ISSUES OF RELIABILITY AND SAFETY OF ENERGY

Belyaev N. A., Egorov A. E., Korovkin N. V., Chudny V. S. Economic aspects of ensuring the capacity adequacy of electric power systems.....	4
Kiseleva A. I., Fokin A. M. Integrated approach to assessment of impact of beyond-design modes on operation of steam supply systems	10
Tikhonov V. A. On the effect of the periodicity of diagnostic measurements on improving the reliability of high-voltage transformers	18

DESIGN, RESEARCH, CALCULATIONS

Mikhailov V. Ye., Kolpakov S. P., Khomenok L. A., Shestakov N. S. On the prospect of introduction of plasma ignition in power boilers	22
Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginsky A. Y. Summary of heat transfer processes and their comparative evaluation for capillary porous coatings in power plants	29
Zelentsov B. P., Trofimov A. S. Study of functioning of relay protection system under regular check conditions	36
Martynov A. V., Kutko N. E. Expediency of substitution of water heating with air heating involving use of heat pumps	45
Laptev A. G., Farakhov T. M., Basharov M. M. Determining efficiency of removal of dispersed phase from gases and modernization of scrubbers using high-performance packings	50
Nedosekin A. O., Smirnov A. V., Makarenko D. P., Abdoulaeva Z. I. Functional and operational risk as a criterion for assessing the durability of an autonomous energy system.....	56

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-4-9>

УДК 621.311

Экономические аспекты обеспечения балансовой надежности электроэнергетических систем

Беляев Н. А.^{1*}, Егоров А. Е.¹, Коровкин Н. В.², Чудный В. С.³

¹ ФГБУ «Российское энергетическое агентство Министерства энергетики Российской Федерации»
ул. Щепкина, д. 40, Москва, 129110, Россия.

² ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.

³ АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы»
ул. Курчатова, д. 1, лит. А, г. Санкт-Петербург, 194223, Россия.

Поступила / Received 13.11.2018

Принята к печати / Accepted for publication 11.02.2019

Рассмотрены экономические вопросы выбора средств обеспечения балансовой надежности энергосистем. Выполнено сопоставление стоимости различных технических мероприятий по обеспечению балансовой надежности: строительства резервных генерирующих мощностей, сооружения новых или увеличения пропускной способности существующих линий электропередачи. Анализ стоимостных оценок выполняется на основе инвестиционных программ и действующих нормативных правовых актов. На основании полученных результатов даны рекомендации по формированию расчетных моделей энергосистем для оценки показателей балансовой надежности с учетом стоимости различных мероприятий по их повышению.

В сложившейся практике расчетов показателей балансовой надежности структура передающей сети энергосистем представляется многозонной моделью, которая формируется как совокупность зон надежности и связей между ними заданной пропускной способности. Основной целью расчета показателей балансовой надежности является определение необходимого уровня резервирования генерирующих мощностей, то есть объемов резерва мощности и его размещения в энергосистеме, обеспечивающих требуемый уровень балансовой надежности. Исходя из этого, при оценке показателей балансовой надежности и, соответственно, при разработке многозонных моделей целесообразно учитывать ограничения на передачу мощности только по таким участкам сети, стоимость повышения пропускной способности которых сопоставима со стоимостью строительства новых генерирующих мощностей.

Из результатов расчета следует, что при небольшой или средней длине линий электропередачи стоимость 1 кВт ее пропускной способности существенно ниже стоимости 1 кВт установленной мощности нового объекта генерации и только при приближении к предельной длине линий электропередачи указанные стоимости становятся сопоставимы. При формировании многозонных моделей энергосистем целесообразно учитывать не только удаленность узлов энергосистем, но и потенциальную их потребность в резервной мощности. Для удаленных узлов при небольшой их потребности в резерве мощности выделение их в отдельные зоны надежности является целесообразным.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электроэнергетическая система, балансовая надежность, электрическая сеть, многозонная модель, пропускная способность

Адрес для переписки:

Беляев Н. А.
ФГБУ РЭА Минэнерго России,
ул. Щепкина, д. 40, Москва, 129110, Россия,
e-mail: Belyaev.NA@yandex.ru

Address for correspondence:

Belyaev N. A.
Russian Energy Agency Ministry of Energy of the Russian
Federation,
Shchepkina str., 40, Moscow, 129110, Russia,
e-mail: Belyaev.NA@yandex.ru

Для цитирования:

Беляев Н. А., Егоров А. Е., Коровкин Н. В., Чудный В. С.
Экономические аспекты обеспечения балансо-
вой надежности электроэнергетических систем.
Надежность и безопасность энергетики. 2019. – Т. 12, –
№1. – С. 4–9.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-4-9>

For citation:

Belyaev N. A., Egorov A. E., Korovkin N. V., Chudny V. S. [Eco-
nomic aspects of ensuring the capacity adequacy of electric
power systems]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki =
Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no. 1,
pp. 4–9. (in Russian)
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-4-9>

Economic aspects of ensuring the capacity adequacy of electric power systems

Belyaev N. A.^{1*}, Egorov A. E.¹, Korovkin N. V.², Chudny V. S.³

¹ Russian Energy Agency Ministry of Energy of the Russian Federation
Shchepkina str., 40, Moscow, 129110, Russia.

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Polytechnicheskaya str., 29, St. Petersburg, 195251, Russia.

³ Scientific and Technical Center of Unified Power System
Kurchatova str. 1A, St. Petersburg, 194223, Russia.

The present report deals with economic issues of selecting means ensuring the capacity adequacy of electric power systems. Cost analysis of various engineering measures ensuring the capacity adequacy has been performed, namely: construction of backup generating facilities, erection of new power transmission lines, or increase of transmission capacity of existing power lines. The cost-based analysis has been conducted based on investment programs and regulatory acts in place. Recommendations on developing computational models of power systems have been given based on the results obtained in order to assess the capacity adequacy parameters, with account made for the cost of various engineering measures to be taken for their improvement.

In prevailing practice of calculation of capacity adequacy parameters, the structure of electric power systems transmission network is presented as a transport model which makes an aggregate of reliability zones and tie-lines between them of a given transmission capacity. The main objective of calculation of capacity adequacy parameters is to determine the required generating capacity redundancy level, i.e. the values of the capacity margin and its location within electric power systems to ensure a required level of capacity adequacy. With that in mind, when evaluating and accordingly when forming transport models, it should be useful to take into account the transmission constraints only for those power grid segments, whose cost of transmission capacity increase is comparable with that of construction of new generating facilities.

On the basis of calculation data, one may state that for overhead electric lines of short or average length the cost of 1 kW of its transmission capacity will be considerably lower than that of installed capacity of a new generating facility, with the above costs comparable only with the length of the line close to its critical value. When forming transport models of electric power systems, it is useful to take into account not only the distance between electric power system nodes, but also their potential need of margin capacity. As far as remote nodes are concerned, if these are of low need in margin capacity, it should be reasonable to separate them as specific reliability areas.

KEYWORDS: Electric power system, capacity adequacy, power grid, transport model of power grid, transmission capacity

Введение

Исследования балансовой надежности (БН) традиционно представляют собой актуальную задачу планирования развития электроэнергетических систем (ЭЭС), интерес к которой проявляют не только научное сообщество и организации отрасли, непосредственно отвечающие за функционирование и развитие ЭЭС, но и субъекты рынка электроэнергии и мощности в целом. Это связано, прежде всего, с проблемой резервирования генерирующих мощностей, поскольку технологически необходимый для обеспечения требуемого уровня надежности электроснабжения потребителей резерв мощности, подлежащий оплате на рынке мощности, может быть объективно обоснован только на основе расчетов показателей балансовой надежности (ПБН) [1, 2].

Задачам анализа балансовой надежности в отечественной и зарубежной литературе уделено большое внимание. Кроме различных моделей и методов оценки ПБН, к настоящему времени как в России, так и за рубежом для выполнения соответствующих расчетов разработаны специализированные программные комплексы (отечественные: ПВК «Орион», ПВК «Янтарь» и

др.; зарубежные GE MARS, GridView и др.) [3, 4]. Несмотря на это, отдельные задачи в рамках оценки ПБН ЭЭС в настоящее время не имеют однозначного решения и поэтому представляют научный интерес [5]. К таким задачам относятся, в том числе, моделирование передающей сети и учет ограничений на передачу мощности при оценке ПБН ЭЭС со слабыми связями сложнзамкнутой конфигурации.

Статья посвящена экономическим аспектам моделирования передающей сети при исследованиях БН ЭЭС. Рассмотрены общие вопросы моделирования ЭЭС в задачах оценки ПБН и оптимизации резервов мощности, затем представлен анализ целесообразности учета в данных задачах различных технологических ограничений на передачу мощности на основе сравнения стоимости резервной мощности и оценки стоимости различных мероприятий по повышению пропускной способности электрической сети.

Многозональные модели ЭЭС

В сложившейся практике расчетов ПБН структура передающей сети ЭЭС представляется многозонной

пропускную способность ЛЭП с учетом применения УКРМ, которые позволяют повысить пропускную способность электрической сети и выровнять загрузку отдельных ее элементов, поскольку стоимость УКРМ на порядок ниже стоимости новой генерирующей мощности или новой ЛЭП. Номинальная мощность и места размещения УКРМ могут быть определены по результатам расчетов электрических режимов ЭЭС.

2. Узлы ЭЭС, находящиеся на удалении до 400 км (предельная длина ЛЭП 220 кВ), целесообразно объединять в одну зону надежности, поскольку стоимость усиления пропускной способности в расчете на 1 кВт значительно ниже стоимости новой генерирующей мощности, а минимальная стоимость новой ЛЭП сравнима со стоимостью объекта генерации средней мощности (до 150 МВт).

3. Узлы (группы узлов) ЭЭС, находящиеся на удалении от 400 до 1000 км, целесообразно объединять в одну зону надежности только в случае, если их потенциальная потребность в резервной мощности составляет более 300–750 МВт (в зависимости от удаленности). В противном случае рассматривать строительство новых ЛЭП нецелесообразно и ограничения на передачу мощности между указанными узлами (группами узлов) необходимо учитывать при оценке ПБН.

4. Узлы (группы узлов) ЭЭС, находящиеся на удалении более 1000 км, относятся к отдельным зонам надежности, поскольку стоимость строительства новой ЛЭП на такие расстояния сопоставима со стоимостью нового объекта генерации соответствующей мощности.

Список использованных источников

1. Манов Н. А., Чукреев Ю. Я., Бобылева Н. В., Соловьева Л. П. Методические положения исследования перспективной балансовой надежности Единой электроэнергетической системы России. Известия Российской академии наук. Энергетика 2009; (5): 74–79.
2. Крупнев Д. С., Лебедева Л. М., Ковалев Г. Ф., Беляев Н. А., Егоров А. Е., Громов Р. Е. К оценке уровня резервирования генерирующей мощности в Единой энергосистеме России. Энергетическая политика 2018; (1): 33–44.
3. Чукреев Ю. Я., Чукреев М. Ю. Модели оценки показателей балансовой надёжности при управлении развитием электроэнергетических систем. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН 2014: 207.
4. Ковалёв Г. Ф., Лебедева Л. М. отв. ред. Н. И. Воропай. Надежность систем электроэнергетики. Новосибирск: Наука 2015: 224.
5. Billinton R., Huang D. Effects of load sector demand side management applications in generating capacity adequacy assessment. IEEE Transactions on Power Systems 2011; (27): 335–343.

6. Шаргин Ю. М., Ковязин А. Л., Попов Е. Е., Смирнова Л. С. Определение предельного перетока в контролируемых сечениях с помощью метода эквивалентных преобразований. Известия НИИ постоянного тока 2011; (65): 66–76.

7. Беляев Н. А., Егоров А. Е., Коровкин Н. В., Чудный В. С. Разработка моделей электроэнергетических систем для анализа надёжности обеспечения баланса мощности. Электрические станции 2015; (11): 47–53.

8. Беляев Н. А., Коровкин Н. В., Чудный В. С. Формирование расчетных моделей электроэнергетических систем для оценки показателей балансовой надежности. Электричество 2018; (5): 11–17.

9. Справочник по проектированию электрических сетей под ред. Д. Л. Файбисовича. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Изд-во НЦ ЭНАС 2012: 376.

10. Li W. Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods and Applications. NJ: IEEE Press 2005: 325.

References

1. Manov N. A., Chukreev Yu. Ya., Bobyliova N. V., Solovieva L. P. Methodical provisions of studies of prospective capacity adequacy of the Unified Energy System of Russia. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energetika 2009; (5): 74–79. (In Russ.)
2. Krupnev D. S., Lebedeva L. M., Kovalev G. F., Belyaev N. A., Yegorov A. Ye., R. E. Gromov On assessment of generating capacity redundancy margin within the Unified Energy System of Russia. Energy policy 2018; (1): 33–44. (In Russ.)
3. Chukreev Yu. Ya., Chukreev M. Yu. Models of evaluation of capacity adequacy indices when managing the development of electric power systems. Syktvykar: Komi scientific centre of RAS Ural division 2014: 207. (In Russ.)
4. Kovaliov G. F., Lebedeva L. M., main editor N. I. Voropay. Reliability of electric power systems. Novossibirsk: Nauka 2015: 224. (In Russ.)
5. Billinton R., Huang D. Effects of load sector demand side management applications in generating capacity adequacy assessment. IEEE Transactions on Power Systems 2011; (27): 335–343. (In Eng.)
6. Sharguin Yu. M., Koviazin A. L., Popov Ye. Ye., Smirnova L. S. Assessment of marginal flows in controlled sections by applying equivalent transformation method. Proceedings of HVDC Power Transmission Research Institute 2011; (65): 66–76. (In Russ.)
7. Belyaev N. A., Yegorov A. Ye., Korovkin N. V., Chudny V. S. Development of models of electric power systems to analyze the reliability of capacity adequacy provision. Power plants 2015; (11): 47–53. (In Russ.)
8. Belyaev N. A., Korovkin N. V., Chudny V. S. Development of computational models of electric power systems for the evaluation of capacity adequacy indices. Electricity 2018; (5): 11–17. (In Russ.)
9. Handbook for power grids designing eds. D. I. Faibisovitch, 4th ed., rev. M., Ed. NC ENAS 2012: 376. (In Russ.)
10. Li W. Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods and Applications. NJ: IEEE Press 2005: 325. (In Eng.)



<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-10-17>

УДК: 621.1

Комплексный подход к оценке влияния непроектных режимов на работу систем пароснабжения

Киселева А. И.^{1*}, Фокин А. М.²

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

² Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Россия, 214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, д.1

Поступила / Received 22.10.2018

Принята к печати / Accepted for publication 20.02.2019

Объектом исследования являются паровые сети г. Смоленска. Цель — определение влияния непроектных (нерасчетных) режимов на функционирование всей системы пароснабжения. Непроектные режимы промышленного пароснабжения являются серьезной проблемой для всех элементов системы: не обеспечивают полноценную загрузку турбин, приводят к высоким сверхнормативным потерям тепла и теплоносителя, а также влекут за собой нарушение технологических процессов. Проведен анализ статистических данных по снижению промышленных отборов пара, обработаны и проанализированы архивные данные по отпуску и потреблению тепла в 2007–2017 гг. Выявлено наличие методической ошибки при учете тепловой энергии и теплоносителя расходомерами переменного перепада давления, настроенными на перегретый и сухой пар. Выполнен расчет показателей качества тепловых сетей, определены предельно допустимые длины участков паропровода, позволяющие транспортировать потребителю перегретый пар независимо от снижения нагрузки. Проанализировано влияние степени износа изоляции и диаметра трубопровода на изменение агрегатного состояния теплоносителя, определена предельная нагрузка для паровых сетей, составляющая 30% от проектной. Установлено, что при снижении промышленных отборов, ТЭЦ вынуждена выводить турбину из работы, так как падение нагрузки более чем на 50% приближает работу турбины к конденсационному режиму и снижает технико-экономические показатели ТЭЦ до предельно допустимых значений. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что такая проблема как нерасчетные режимы, особенно в системах пароснабжения, требует комплексного подхода, так как влияние на отдельный элемент изолированно от системы приводит к изменению показателей работы остальных элементов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловые сети, промышленные теплоэнергетические системы, пароснабжение, теплоэлектроцентрали, непроектные режимы, системы теплоснабжения

Адрес для переписки:

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», кафедра ПТС,
ул. Красноказарменная, 14, 111250, г. Москва, Россия,
e-mail: sashulka_kiseleva@mail.ru

Для цитирования:

Киселева А. И., Фокин А. М. Комплексный подход к оценке влияния непроектных режимов на работу систем пароснабжения. Надежность и безопасность энергетики. 2019. – Т. 12, №1. – С. 10–17.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-10-17>

Address for correspondence:

Kiseleva A. I.
Federal state budgetary educational institution of higher education «National research University «MPEI», Department PTS,
Krasnokazarmennaya ulica, 14, 111250, Moscow, Russia,
e-mail: sashulka_kiseleva@mail.ru

For citation:

Kiseleva A. I., Fokin A. M. [Integrated approach to assessment of impact of beyond-design modes on operation of steam supply systems]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 10–17. (in Russian)
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-10-17>

Integrated approach to assessment of impact of beyond-design modes on operation of steam supply systems

Kiseleva A. I.^{1*}, Fokin A. M.²

¹ Federal state budgetary educational institution of higher education «National research University «MPEI»
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14

² Smolensk branch of Federal state budgetary educational institution of higher education «National research University «MPEI»
Russia, 214013, Smolensk, Energeticheskij proezd, 1.

The object of the study are the steam networks of Smolensk. The purpose of the article is to determine the influence of beyond-design modes on the functioning of the entire steam supply system. Beyond-design modes of industrial steam supply pose a serious problem for all elements of the system: they make it difficult to fully load the turbines, lead to high excess losses of heat and coolant, and also lead to disruption in technological processes. Analysis of statistical data on reduction of industrial steam extraction has been carried out, archived data on heat supply and consumption have been processed and analyzed over the period from 2007 to 2017. A methodological error is found in the accounting of thermal energy and coolant by variable pressure drop flowmeters designed to handle superheated and dry steam. Calculation of heat network quality indicators is carried out, maximum permissible lengths of steam pipeline sections are determined, enabling to transport superheated steam to consumer regardless of the load reduction. The influence of the extent of wear of insulation and the diameter of the pipeline on the change in the aggregate state of the coolant has been analyzed, and the maximum load for steam networks has been found as being 30% of the designed one. It has been established that, with industrial extraction decreased, the CHPP is forced to disengage the turbine from operation, since a load drop of more than 50% brings the turbine to the condensation mode and reduces the technical and economic performance of the CHPP to the threshold permissible values. The obtained results enable to draw a conclusion that such a problem as beyond-design modes, especially in steam supply systems, requires an integrated approach, since the influence on an individual element in isolation from the system leads to a change in the performance of the remaining elements.

KEYWORDS: heat networks, industrial heat and power systems, steam supply, combined heat and power plants, beyond-design modes, heat supply systems

Снижение уровня промышленного потребления пара является известным фактом и отражается на всех элементах системы теплоснабжения «источник теплоты — тепловые сети — потребитель».

Большая часть функционирующих на данный момент источников теплоты была построена еще в начале 1960-х гг. Для систем теплоснабжения, обеспечивающих теплоснабжение административных и жилых зданий, нагрузка не изменилась, а зачастую даже увеличилась. Иначе обстоят дела с ТЭЦ, которые проектировалась для группы уже существующих промышленных потребителей. Распад СССР, внутренняя политика государства и многие другие факторы привели к упадку промышленного производства.

В связи с уменьшением отпуска тепла от источника промышленные потребители, подключенные к уже существующим паропроводам, вынуждены получать пар с более низкими термодинамическими параметрами. Установка паровых котельных для потребителей является дорогостоящим и зачастую неподъемным мероприятием, снижающим до неприемлемых пределов рентабельность предприятия, поэтому они вынуждены потреблять пар от источника по его условиям, зачастую, по завышенным тарифам.

Непроектные режимы паропотребления являются серьезной проблемой тепловых электростанций, поскольку это делает проблематичной полноценную загрузку турбин, спроектированных специально для этих целей. Так же серьезно проблема стоит и для владель-

цев сетевых паропроводов, так как транспортировка малых расходов пара через большие проходные сечения существующих паропроводов весьма убыточна и приводит к значительным потерям пара и конденсата [1]. При уменьшении расхода пара и его прохождении через существующий диаметр паропроводов происходит конденсация пара, которая может привести к нарушениям технологического процесса у потребителей и недоучету тепловой энергии.

Рассмотрим последствия снижения промышленных отборов на каждый из элементов системы теплоснабжения на примере Смоленской ТЭЦ-2. Особенности тепловых сетей, обеспечивающих пар промышленным абонентам, являются:

- большой срок службы трубопровода ($\tau_{\min}=20$ лет, $\tau_{\max}=50$ лет);
- работа в нерасчетном режиме. На данный момент загрузка составляет 30% от расчетной;
- несоблюдение графика проведения планово-предупредительных работ в течение всего срока службы.

В свете вышеперечисленных особенностей к работе данного паропровода имеются следующие замечания: большие тепловые потери и, как следствие, несоответствие параметров теплоносителя договорным значениям. Основной задачей исследования являлся комплексный анализ влияния нерасчетного режима на существующую систему теплоснабжения. Первоначально ТЭЦ-2 была спроектирована на комплекс промышленных потребителей, суммарная нагрузка состав-

телям, к качеству теплоизоляции. Результаты расчета показывают, что при проектном режиме отпуска пара толщина тепловой изоляции при любом диаметре трубопровода практически не влияет на фазовое состояние теплоносителя (до степени износа 90%).

Ситуация меняется с уменьшением нагрузки и работой в непроектом режиме, причем чем меньше диаметр паропровода, тем сильнее скорость начала конденсации зависит от расчетной нагрузки и менее от степени износа изоляции.

Современные руководящие документы, такие, как [9], регулируют нормы плотности тепловых потоков через изолированный трубопровод без учета фазового состояния теплоносителя. В случае, если теплоноситель пар, возможна ситуация, при которой термическое сопротивление изоляции соответствует нормативным значениям, но при этом происходит изменение фазового состояния пара (конденсация из-за уменьшения расхода), т. е. существующие нормативные документы не учитывают качественные показатели теплоносителя.

Проведенные исследования показывают 2 основные проблемы паровых сетей в России:

1. непроектные режимы;
2. неудовлетворительное качество тепловой изоляции.

Полученные расчеты и зависимости показывают, что при снижении нагрузки ниже 30% от проектного значения, независимо от диаметра трубопровода качественные показатели теплоносителя тепловые сети обеспечить не могут.

Такой предельный уровень отличия от проектного режима (30% от расчетной нагрузки) можно порекомендовать теплоснабжающим компаниям в качестве критерия для прекращения эксплуатации промышленных паропроводов [10]. Это подтверждается тем, что большая часть паровых систем теплоснабжения была построена при подъеме промышленного производства и не рассчитана на снижение нагрузки. С технической стороны, паропроводы, рассчитанные на перегретый пар, не имеют дренажей, что в свою очередь при конденсации за счет низкой нагрузки приводит к затоплению паропровода за несколько дней и требует аварийной остановки паропровода для слива воды. Такие остановки паропровода приводят к нарушению режима работы турбины и технологических процессов у потребителей.

Полученные результаты и зависимости позволяют определить требуемые диаметры и толщину изоляции для паропроводов, работающих в непроектом режиме, без изменения геометрической конфигурации уже существующей сети. Для поддержания параметров пара, соответствующих договорным значениям потребителям рекомендуется произвести перекладку тепловых сетей с уменьшением диаметра трубопроводов. При невыполнении этих мероприятий эксплуатацию таких паровых сетей рекомендуется прекратить.

Список использованных источников

1. Елин Н. Н., Шомов П. А., Петров П. А., Голыбин М. А. Моделиро-

вание и оптимизация трубопроводных сетей паропроводов промышленных предприятий. Вестник Ивановского государственного энергетического университета 2015; (2): 63–66.

2. Архангельская Е. Л., Елизарова Н. Н. Информационное обеспечение управления качеством теплообеспечения потребителей. Вестник Ивановского государственного энергетического университета 2012; (4): 66–71.

3. Глинкин С. В. Тепловые массовые балансы на предприятии. Ежеквартальный информационный журнал Spiraskop 2017; (3): 8–11.

4. Сычев А. В. Узкие места в организации паропроводов. Ежеквартальный информационный журнал Spiraskop 2017; (1): 5–10.

5. Власов А. А. Определение оптимальной толщины теплоизоляции паропроводов. Международная научно-техническая конференция молодых ученых 2015; (1): 3145–3150.

6. Киселева А. И., Фокин А. М. Влияние отдельных показателей на качество функционирования паропроводов. Материалы докладов I Поволжской научно-практической конференции 2015; (1): 252–254.

7. Егоров С. Ю., Широкова С. Д. Моделирование паропроводов для транспортировки влажного и перегретого пара для промышленных предприятий. Материалы V международной студенческой научно-практической конференции 2016; (1): 115–119.

8. Свод правил СП-89.13330.2012. Котельные установки. 2012.

9. Свод правил СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. 2012.

10. Киселева А. И., Фокин А. М. Разработка методики определения комплексного показателя качества тепловых сетей. Материалы Международной научно-практической конференции 2017; (1): 73–77.

References

1. Elin N. N., Shomov P. A., Petrov P. A., Golybin M. A. Modeling and optimization of pipeline networks of steam pipelines of industrial enterprises. Bulletin of Ivanovo State Energy University 2015; (2): 63–66. (In Russ.)

2. Arkhangelskaya E. L., Elizarova N. N. Information support for quality management of consumer heat supply. Bulletin of Ivanovo State Energy University 2012; (4): 66–71. (In Russ.)

3. Glinkin S. V. Mass heat balances at the enterprise. Quarterly information magazine Spiraskop 2017; (3): 8–11. (In Russ.)

4. Sychev A. V. Bottlenecks in the organization of steam pipelines. Quarterly information magazine Spiraskop 2017; (1): 5–10. (In Russ.)

5. Vlasov A. A. Determination of the optimal thickness of the steam pipe insulation. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists 2015; (1): 3145–3150. (In Russ.)

6. Kiseleva A. I., Fokin A. M. The influence of individual indicators on the quality of steam lines. Materials reports I Volga scientific-practical conference 2015; (1): 252–254. (In Russ.)

7. Yegorov S. Yu., Shirokova S. D. Simulation of steam pipelines for the transportation of wet and superheated steam for industrial enterprises. Proceedings of the V International Student Scientific and Practical Conference 2016; (1): 115–119. (In Russ.)

8. The code of rules SP-89.13330.2012. Boiler installations. 2012.

9. The code of rules SP 61.13330.2012. Thermal insulation of equipment and pipelines. 2012.

10. Kiseleva A. I., Fokin A. M. Development of methods for determining the integrated quality indicator of heat networks. Materials of the International scientific-practical conference 2017; (1): 73–77. (In Russ.)

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-18-21>
УДК 621.311.1

О влиянии периодичности диагностических измерений на повышение надёжности высоковольтных трансформаторов

Тихонов В. А.

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет»
ул. Макаренко, 40, 665729, г. Братск, Россия

Поступила / Received 7.12.2018

Принята к печати / Accepted for publication 11.02.2019

Рассмотрено влияние периодичности диагностических измерений на эксплуатационное состояние высоковольтных трансформаторов. Приведены примеры дефектов переключающих устройств преобразовательных трансформаторов и методы их выявления. Дано обоснование важности распознавания дефектов на ранней стадии их возникновения. Исследовано влияние кратности перенапряжений на срок службы преобразовательных трансформаторов алюминиевой промышленности. На основе анализа срока службы преобразовательных трансформаторов одного из мощных алюминиевых заводов, где 83% преобразовательных трансформаторов выработали нормативный ресурс. Показано, что в 40% случаев можно было бы избежать их отказов при своевременном выявлении и устранении возникающих дефектов. Представлены примеры дефектов РПН (регуляторов под нагрузкой) преобразовательных трансформаторов и методы их выявления. Обоснована важность распознавания дефектов на ранней стадии их возникновения. Разработан метод хроматографического анализа растворённых газов в трансформаторном масле для качественного определения дефектов и способов их устранения. Приведены примеры диагностики преобразовательных трансформаторов при рабочем напряжении и рабочей нагрузке, обеспечивающие наиболее качественную эксплуатационную характеристику преобразовательных трансформаторов. Обоснована периодичность проведения диагностических измерений и снижения дефектов и отказов. Исследован вопрос диагностики состояния преобразовательного трансформатора ТДНП-40000/10 на предприятии алюминиевой промышленности. В настоящее время разрабатываются методики диагностики на основе хроматографического анализа растворённых газов в трансформаторном масле. Представленный метод оценки эксплуатационных параметров трансформаторов позволяет проводить безопасную эксплуатацию высоковольтных трансформаторов и повысить надёжность схемы электроснабжения заводов алюминиевой промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диагностика, хроматограмма, высоковольтный трансформатор, переключающее устройство, схема электроснабжения, алюминиевая промышленность, безопасность эксплуатации

Адрес для переписки:

Тихонов В. А.
ФГБОУ ВО «БрГУ», кафедра УТС,
ул. Макаренко, 40, 665709, г. Братск, Россия,
e-mail: Tikhonovva00@mail.ru

Address for correspondence:

Tikhonov V. A.
Bratsk State University, Department EMS,
Makarenko str., 40, 665709, Bratsk, Russia,
e-mail: Tikhonovva00@mail.ru

Для цитирования:

Тихонов В. А. О влиянии периодичности диагностических измерений на повышение надёжности высоковольтных трансформаторов. *Надёжность и безопасность энергетики*. 2019. – Т. 12, №1. – С. 18–21.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-18-21>

For citation:

Tikhonov V. A. [On the effect of the periodicity of diagnostic measurements on improving the reliability of high-voltage transformers]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 18–21. (in Russian)
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-18-21>

On the effect of the periodicity of diagnostic measurements on improving the reliability of high-voltage transformers

Tikhonov V. A.

Bratsk State University

40 Makarenko str., 665709, Bratsk, Russia.

The influence of the periodicity of diagnostic measurements on the operational state of high-voltage transformers is considered. Examples of defects of switching devices of converter transformers and methods for their detection are given. The rationale for the importance of recognition of defects at an early stage of their occurrence is given. The influence of the multiplicity of overvoltages on the service life of converter transformers in the aluminum industry is investigated. Based on the analysis of the service life of converter transformers of one of the powerful aluminum plants, where 83% of converter transformers have exhausted their standard service life, it is shown that in 40% of cases it would be possible to avoid their failures, with timely detection and elimination of emerging defects. Examples of defects of OLR (on-load regulators) of converter transformers and methods for their detection are given. The importance of recognition of defects at an early stage of their occurrence is substantiated. A method for chromatographic analysis of dissolved gases in transformer oil has been developed for the qualitative determination of defects and ways to eliminate them. Examples of diagnostics of converter transformers at operating voltage and working load are given, providing the best quality operational characteristics of converter transformers. The periodicity of diagnostic measurements and the reduction of defects and failures has been substantiated. The question of diagnosing the state of the converter transformer TDNP-40000/10 at an enterprise of the aluminum industry is investigated. Currently, diagnostic methods are being developed based on chromatographic analysis of dissolved gases in transformer oil. The presented method of evaluating the operating parameters of transformers allows for the safe operation of high-voltage transformers and enables to increase the reliability of the power supply scheme of aluminum industry plants.

KEYWORDS: diagnostics, chromatogram, high-voltage transformer, switching device, power supply circuit, aluminum industry, operational safety

Широкое внедрение получила методика проведения диагностических измерений высоковольтных трансформаторов в рабочем режиме. В данном случае диагностика проводится под рабочим напряжением и рабочей нагрузкой, то есть без отключения преобразовательных трансформаторов и выключателей от сети. Диаграммы количества проведённых диагностических измерений и происходящих аварийных ситуаций представлены на рисунке 1.

Анализ представленных зависимостей показывает, что с увеличением диагностических измерений [1] снижается аварийность электрооборудования и трансформаторов за счёт проведения мелких и средних ремонтов [2]. Тем самым снижается вероятность возникновения крупных аварий и, как следствие, повышается надёжность системы электроснабжения.

Самым известным примером диагностики является хроматографический анализ растворённых газов в трансформаторном масле. С помощью измеряемых концентраций газов в масле и сравнения их с граничными допустимыми значениями определяются виды дефектов в трансформаторе. В таблице представлена хроматограмма газов преобразовательного трансформатора ТДНП-40000/10 (трансформатор

трёхфазный, с дутьём, с регулированием напряжения под нагрузкой, мощностью 40000 кВт, сетевым напряжением 10 кВ).

Из таблицы следует, что при плановых диагностических замерах 27.03.2017 г. было обнаружено превышение граничных концентраций газов водорода, метана, ацетилена, этилена и этана. Преобразовательный

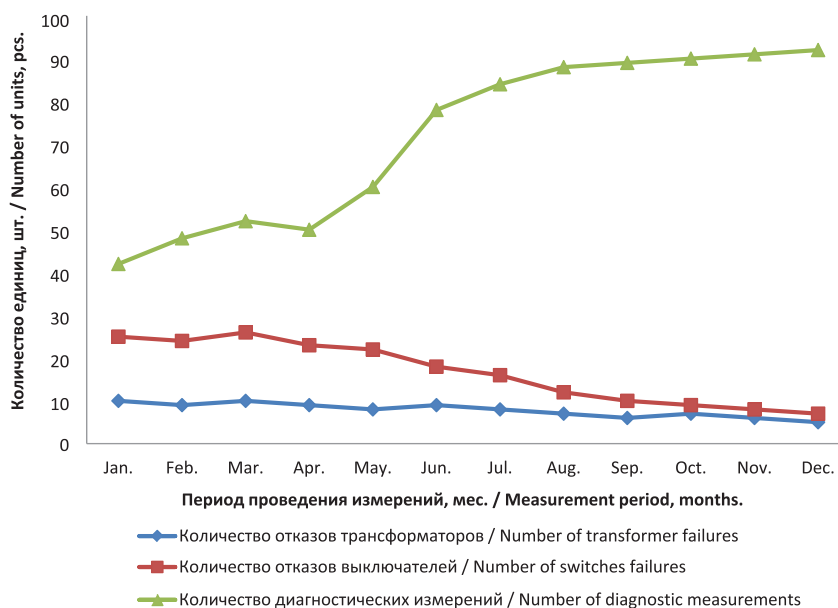


Рисунок 1. Помесячное распределение отказов трансформаторов и выключателей в зависимости от количества диагностических измерений

Figure 1. Monthly distribution of failures of transformers and switches depending on the number of diagnostic measurements

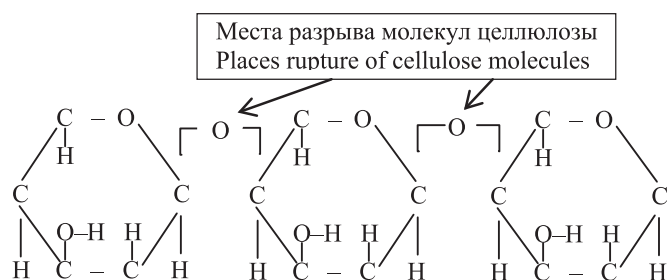


Рисунок 3. Структура молекулы целлюлозы
Figure 3. Cellulose molecule structure

коммутационные перенапряжения, грозовые перенапряжения, термические нагревы проводников и системы охлаждения, окисление.

Основными причинами разрушения молекул целлюлозы, как видно из рисунка 3, являются разрывы молекул в местах кислородных связей. На ускорение этого процесса оказывают непосредственное влияние влага (H_2O), окисление (O_2), повышенная температура, приводящая как к интенсивному окислению, так и к запуску процесса – пиролиза. Таким образом, наличие вредных для целлюлозы воздействующих факторов губительно сказывается на разрушении бумажной изоляции и в целом на надёжной эксплуатации трансформатора.

Поэтому очень важно именно в межремонтный период [10] и под рабочим напряжением и рабочей нагрузкой проводить учащённую диагностику преобразовательных трансформаторов, не менее 50 раз за контролируемый период (рисунок 2).

Выводы

1. Увеличение периодичности диагностических измерений приводит к эффективному контролю за состоянием высоковольтных трансформаторов и позволяет выявлять дефекты на ранней стадии их возникновения. При этом аппроксимация достоверности и повторяемости результатов находится в допустимых пределах. Так как трансформаторы питают потребителей электролизного производства алюминия, которое характеризуется непрерывностью технологического процесса, то при проведении ремонтных работ, связанных с отключением силового трансформатора, его нагрузка перераспределяется на другие трансформаторы. При такой ремонтной схеме электроснабжения увеличивается сила тока в линии и снижается напряжение в ней, что приводит к снижению силы тока и активной мощности нагрузки.

2. При своевременном выявлении дефектов и поддержании на высоком уровне эксплуатационной готовности высоковольтных трансформаторов с применением параллельных ремонтных процессов, работы можно провести в часы максимума энергосистемы, что обеспечит снижение мощности и оплаты за неё и переход ремонтных работ в режим самокупаемости.

Список использованных источников

1. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина Ю. И. Методы ана-

лиза данных и их реализация в системах поддержки принятия решений. Учебное пособие. г. Пенза. 2014;: 118.

2. Карташев И. И., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г. Управление качеством электроэнергии. М. Издательский дом МЭИ 2017;: 320.

3. Остроух А. В. Интеллектуальные системы. Учебное пособие. гор. Красноярск. Научно-инновационный центр 2015;: 110.

4. Добаев А. З. Использование методов математической статистики для анализа данных систем учета электроэнергии. Материалы VI международной конференции. г. Владикавказ 2014;: 37–41.

5. Power D. J., Sharda R., Burstein F. Decision support systems. John Wiley & Sons, Ltd. 2015;: 76.

6. Медведева М. Л., Кузьмин С. В., Кузьмин И. С., Шманев В. Д. Анализ и прогноз аварийности распределительных сетей и электроприёмников 6–10 кВ в горной отрасли. Надежность и безопасность энергетики 2017; Том 10 (2): 120–125.

7. Довгун В. П., Чернышев М. О., Малошенков О. Е. Гибридные силовые фильтры для трёхфазных четырёхпроводных сетей. Известия вузов. Проблемы энергетики 2016; (2): 11–19.

8. Вагин Г. Я., Севастьянов А. А., Солнцев Е. Б., Терентьев П. В. К вопросу о выборе нулевых проводников в городских электрических сетях. Промышленная энергетика 2014; (2): 22–25.

9. Силакова В. В. Анализ общеэкономических факторов технологического риска предприятий непрерывного типа производства в России. Экономика и менеджмент систем управления 2016; т. 12(2): 54–62.

10. Пестерева Е. КАНБАН и “точно вовремя” на Toyota. Менеджмент начинается на рабочем месте. г. Москва. Альпина Бизнес Букс 2014;: 224.

References

1. Mikheev M. Yu., Prokofyev O. V., Semochkina Yu. I. Methods of data analysis and their implementation in decision support systems. Tutorial. Penza. 2014;: 118. (In Russ.)

2. Kartashev I. I., Tulskey V. N., Shamonov R. G. Power quality management. M. Publishing House MEI 2017;: 320. (In Russ.)

3. Ostroukh A. V. Intellectual systems. Tutorial. mountains Krasnoyarsk. Research and Innovation Center 2015;: 110. (In Russ.)

4. Dobaev A. Z. The use of mathematical statistics methods for analyzing data from electricity metering systems. Proceedings of the VI International Conference. The city of Vladikavkaz 2014;: 37–41. (In Russ.)

5. Power D. J., Sharda R., Burstein F. Decision support systems. John Wiley & Sons, Ltd. 2015;: 76. (In Eng.)

6. Medvedeva M. L., Kuzmin S. V., Kuzmin I. S., Shmanev V. D. Analysis and forecast of the accident rate of distribution networks and 6–10 kV electrical receivers in the mining industry. Reliability and safety of energy in 2017; Volume 10(2): 120–125. (In Russ.)

7. Dovgun V. P., Chernyshev M. O., Maloshenok O. E. Hybrid power filters for three-phase four-wire networks. News of universities. Energy Issues 2016; (2): 11–19. (In Russ.)

8. Vagin G. Ya., Sevastyanov A. A., Solntsev E. B., Terentyev P. V. To the question of the choice of zero conductors in urban electrical networks. Industrial Energy 2014; (2): 22–25. (In Russ.)

9. Silakova V. V. Analysis of general economic factors of technological risk of enterprises of continuous type of production in Russia. Economics and Management Management Systems 2016; Vol.12 (2): 54–62. (In Russ.)

10. Pestereva E. KANBAN and “just in time” at Toyota. Management begins at the workplace. Moscow. Alpina Business Books 2014;: 224. (In Russ.)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-22-28>
УДК 621.311

О перспективе внедрения систем плазменного розжига на энергетических котлах

Михайлов В. Е., Колпаков С. П., Хоменок Л. А.*, Шестаков Н. С.

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»).
Ул. Атаманская, 3/6, 191167, г. Санкт-Петербург, Россия

Поступила / Received 23.11.2018

Принята к печати / Accepted for publication 25.02.2019

Одним из важнейших вопросов для отечественной энергетики является создание и дальнейшее широкое внедрение твердотопливных энергетических блоков на суперсверхкритические параметры пара с высоким КПД (43–46%) и улучшенными экологическими показателями. Это позволит существенно снизить использование природного газа.

В то же время одним из существенных недостатков эксплуатации пылеугольных энергоблоков является необходимость использования значительного количества мазута при пусках и остановах котлов для стабилизации горения угольного факела на переменных режимах работы котла.

В этой связи на твердотопливных ТЭС требуется создание мазутного хозяйства со всеми проблемами по обеспечению работоспособности (разогрев мазута зимой), надежности и безопасности, что увеличивает как капитальные затраты на строительство ТЭС, так и себестоимость отпускаемой электроэнергии.

Практическим решением вышеуказанных проблем в настоящее время является применение плазменной технологии воспламенения угольного факела, основанной на термохимической подготовке топлива к сжиганию. Рассматриваются материалы разработок ОАО «НПО ЦКТИ» по применению плазмотронов в котлах ТЭЦ металлургических комбинатов РФ.

Системы плазменного розжига твердого топлива в котлах разработаны российскими специалистами и были внедрены на ряде угольных электростанций в Российской Федерации, Монголии, Северной Корее, Казахстане. Плазменный розжиг твердого топлива широко используется в Китае почти на 30% энергетических котлов.

Внедрение плазменно-энергетических технологий позволит повысить энергоэффективность отечественных твердотопливных ТЭС и может широко внедряться при модернизации котлов.

При строительстве новых ТЭС возможен полный отказ от строительства мазутного хозяйства, что снизит капитальные затраты на строительство ТЭС, уменьшит площадь застройки, повысит безопасность ТЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: твердотопливная ТЭС, розжиг угольного факела, плазменная технология, плазмотрон

Адрес для переписки:

Хоменок Л. А.
ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»).
ул. Атаманская, 3/6, 191167, г. Санкт-Петербург, Россия.
e-mail: Khomenok LA@ckti.ru

Address for correspondence:

Khomenok L. A.
JSC «I. I. Polzunov Scientific & Development Association on Research and Design of Power Equipment» (JSC «NPO CKTI»).
3/6, Atamanskaya Str., Saint-Petersburg, Russia, 191167.
e-mail: Khomenok LA@ckti.ru

Для цитирования:

Михайлов В. Е., Колпаков С. П., Хоменок Л. А., Шестаков Н. С. О перспективе внедрения систем плазменного розжига на энергетических котлах. 2019. – Т. 12, №1. – С. 22–28.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-22-28>

For citation:

Mikhailov V. Ye., Kolpakov S. P., Khomenok L. A., Shestakov N. S. [On the prospect of introduction of plasma ignition in power boilers]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 22–28 (in Russian).
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-22-28>

On the prospect of introduction of plasma ignition in power boilers

Mikhailov V. Ye., Kolpakov S. P., Khomenok L. A.*, Shestakov N. S.

JSC «I. I. Polzunov Scientific & Development Association on Research and Design of Power Equipment» (JSC «NPO CKTI»)
3/6, Atamanskaya Str., Saint-Petersburg, Russia, 191167

One of the most important issues for modern domestic power industry is the creation and further widespread introduction of solid propellant energy units for super-critical steam parameters with high efficiency (43–46%) and improved environmental parameters. This will significantly reduce the use of natural gas.

At the same time, one of the major drawbacks of the operation of pulverized coal power units is the need to use a significant amount of fuel oil during start-up and shutdown of boilers to stabilize the burning of the coal torch in the variable boiler operating modes.

In this regard, solid fuel TPPs need to be provided with fuel oil facilities, with all the associated problems to ensure the performance (heating of fuel oil in winter), reliability and safety. All of the above problems increase both the TPP capital construction costs, and the electricity generating cost.

A practical solution to the above problems at present is the use of a plasma technology for coal torch ignition based on thermochemical preparation of fuel for combustion. The materials of the developments of JSC «NPO CKTI» on application of plasmatrons in boilers of thermal power plants at metallurgical complexes of the Russian Federation are also considered.

Plasma ignition systems for solid fuels in boilers were developed by Russian specialists and were introduced at a number of coal-fired power plants in the Russian Federation, Mongolia, North Korea, and Kazakhstan. Plasma ignition of solid fuels is widely used in China for almost 30% of power boilers.

The introduction of plasma-energy technologies will improve the energy efficiency of domestic solid-fuel thermal power plants and can be widely implemented in the modernization of boilers.

During the construction of new TPPs, the construction of fuel oil facilities can be abandoned altogether, which will reduce the capital costs of the construction of thermal power plants, reduce the construction footprint, and increase the TPP safety.

KEYWORDS: solid fuel TPP, coal torch ignition, plasma technology, plasmatron

Топливный баланс электроэнергетики современной России необоснованно смещен к приоритету природного газа. Более 70% от общего потребления топлива отраслью составляет природный газ, доля угля в последние годы не превышала 25–28%.

В США и Китае твердотопливная энергетика составляет значительную долю. Так, например, в США более 50% электроэнергии вырабатывается на твердотопливных ТЭС, и это вполне объяснимо, так как стоимость 1 кВт·ч существенно снижается при использовании твердого топлива (угля) (рисунок 1).

Поэтому энергетическая стратегия России на период до 2030 г. [1–3] правильно ориентирована на развитие угольной энергетики.

Энергетическая стратегия предусматривает формирование рационального топливно-энергетического баланса и развитие угольной энергетики на базе новых более экологически чистых технологий использования угля. Планируется, в частности, создание экологически чистых угольных конденсационных энергоблоков на суперсверхкритические параметры пара с коэффициентом полезного действия 43–46% и мощностью 660–800 МВт.

В результате доля угля в общем потреблении топлива тепловыми электростанциями к концу третьего этапа реализации энергетической стратегии должна увеличиться соответственно с 26 до 34–36%, а доля газа,

наоборот, снизится с 70 до 60%.

Одним из существенных недостатков эксплуатации угольных энергетических котлов ТЭС является необходимость использования значительного количества мазута при пусках и остановках котлов, а также для стабилизации горения угольного факела. Например,

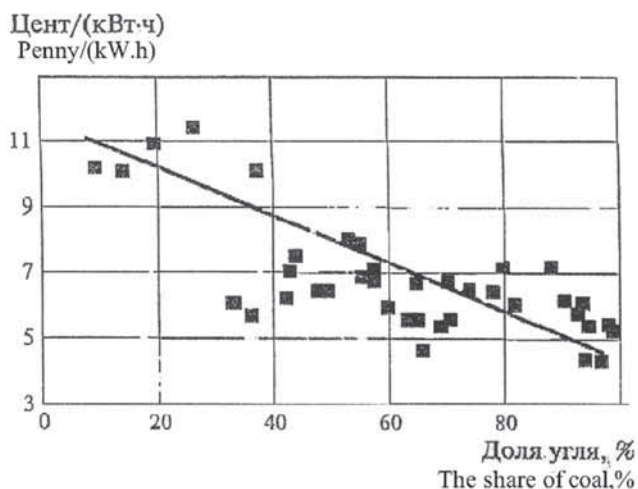


Рисунок 1. Средняя стоимость электроэнергии в отдельных штатах США в зависимости от доли использования угля на ТЭС
Figure 1. The average cost of electricity in individual states of the United States, depending on the proportion of coal used in TPP

Таблица 3. Капитальные затраты при строительстве твердотопливных ТЭС

Table 3. Capital costs in the construction of solid fuel TPP

Капитальные затраты при строительстве (модернизации) ТЭС Capital costs during the construction (modernization) of TPP	
Строительство мазутного хозяйства: 100% Construction of fuel oil facilities: 100%	Установка систем плазменного розжига на котлы: 5–6% от стоимости мазутного хозяйства Installation of plasma ignition systems for boilers: 5–6% of the fuel oil facilities cost
Эксплуатационные затраты Operating costs	
Стоимость мазута и технического обслуживания мазутного хозяйства: 100% The cost of fuel oil and fuel oil maintenance: 100%	Стоимость угля и технического обслуживания системы плазменного розжига: до 30% от стоимости мазутного хозяйства The cost of coal and maintenance of the plasma ignition system: up to 30% of the fuel oil facilities cost
Расход электроэнергии (доля от собственных нужд ТЭС) Electricity consumption (share of TPP own needs)	
На эксплуатацию мазутного хозяйства: не менее 3–5% For operation of fuel oil facilities: at least 3–5%	На эксплуатацию системы плазменного розжига: до 1,0% For operation of plasma ignition system: up to 1,0%

ванию возможности применения систем плазменного розжига на отечественных угольных котлах.

Разработана методика обследования твердотопливного парового котла с целью применения на нем системы плазменного розжига. Основные этапы обследования приведены в таблице 1.

Оценка экономической эффективности внедрения системы плазменного розжига формируется из оценки возможной экономии мазута на пуски и остановки котла, а также оценки стоимости внедрения системы плазменного розжига на котел. Основные параметры указанных оценок приведены в таблице 2.

Сравнительная технико-экономическая оценка применения системы плазменного розжига для ТЭС мощностью от 500 МВт до 1500 МВт по отдельным статьям расходов приведена в таблице 3.

Заключение

1. Внедрение плазменно-энергетических технологий позволит повысить эффективность и конкурентоспособность пылеугольных ТЭС и обеспечить условия для диверсификации топливного баланса РФ.

2. Применение систем плазменного розжига существенно снижает потребление мазута на пылеугольных ТЭС. При проектировании и строительстве новых электростанций возможен полный отказ от мазута (ликвидация мазутного хозяйства на стадии проектирования).

3. Отказ от мазутного хозяйства ТЭС позволит не только экономить на капитальных затратах при строительстве, но и значительно уменьшить площадь застройки территории станции, повысить промышленную и экологическую безопасность объекта.

4. Плазменная система позволяет эффективно сжигать «бедные» низкокалорийные (доменный, генераторный газы) топлива без подсветки дефицитным природным газом.

5. Имеющийся отечественный и зарубежный опыт разработки и внедрения систем плазменного розжига показал необходимость целевого (долевого) финансирования проектов в форме программы с государствен-

ным участием.

Список использованных источников

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1715-р.
2. Тумановский А. Г. Повышение эксплуатационных и экологических показателей угольных ТЭС России. IV Международная научно-техническая конференция «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла». Москва «ВТИ» 2018.
3. Филиппов С. П. Прогнозы спроса на уголь. II Международная научно-техническая конференция «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла». Москва «ВТИ» 2016.
4. Козлитин П. А. Системная эффективность повышения безопасности мазутного хозяйства и ХВО ТЭС с учетом риска. Дис. канд. техн. наук. Саратов 2007;: 177.
5. Научно-технические основы и опыт эксплуатации плазменных систем воспламенения углей на ТЭС. Карпенко Е. И. и др., Новосибирск, «Наука», Сибирское отделение РАН 1998 г.
6. Карпенко Е. И., Мессерле В.Е., Коногоров Н. М. Плазменно-энергетические технологии использования угля для эффективного замещения мазута и природного газа в топливном балансе ТЭС. Теплоэнергетика 2004, (10): 53–60.
7. Наумов Ю. И. и др. Опыт внедрения и перспективы использования электроионизационной технологии для безмазутного розжига и стабилизации горения низкорекреационного топлива на пылеугольных ТЭС. IV Международная научно-техническая конференция «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла». Москва «ВТИ» 2018.
8. Rutberg Ph. «Physies end technology of highcurrent discharges in dense gas media and blows». Novascieng Publishes Tnc 2009.
9. Рутберг Ф. Г. Исследование электрических дуг в паровоздушной смеси в плазматронах переменного тока. Теплофизика высоких температур 2015, (5).

References

1. Russia's energy strategy for the period up to 2030. Order of the Government of the Russian Federation dated November 13, 2009 No. 1715-p.

2. Tumanovsky A. G. Improving operational and environmental performance of coal-fired TPPs in Russia. IV International Scientific and Technical Conference "The use of solid fuels for efficient and environmentally friendly production of electricity and heat." Moscow "VTI" 2018.

3. Filippov S. P. Coal demand forecasts. II International Scientific and Technical Conference "The use of solid fuels for efficient and environmentally friendly production of electricity and heat." Moscow "VTI" 2016.

4. Kozlitsin P. A. Systemic effectiveness of improving the safety of fuel oil facilities and HVO CHP with risk in mind. Saratov 2007;: 177.

5. Scientific and technical background and operating experience of plasma systems for ignition of coal at thermal power plants. Karpenko E.I. et al., Novosibirsk, "Science", Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 1998.

6. Karpenko E. I., Messerle V. E., Konogorov N. M. Plasma – energy technologies of using coal for the effective replacement of fuel oil and natural gas in the fuel balance of thermal power plants. Thermal power 2004, (10): 53–60.

7. Naumov Yu. I., et al Experience of implementation and prospects for the use of electro-ionization technology for oil-free ignition and stabilization of the combustion of low-reactive fuel in pulverized coal-fired power plants. IV International Scientific and Technical Conference "The use of solid fuels for efficient and environmentally friendly production of electricity and heat." Moscow "VTI". 2018.

8. Rutberg Ph. «Physies end technology of highcurrent discharges in dense gas media and blows». Novascieng Publishes Tnc 2009.

9. Rutberg F. G. The study of electric arcs in the vapor-air mixture in alternating current plasmatoms. Thermal physics of high temperatures 2015, (5).



<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-29-35>

УДК 621.311

Обобщение процессов теплопередачи и их сравнительная оценка для капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках

Генбач А. А.¹, Бондарцев Д. Ю.^{*2}, Шелгинский А. Я.³

¹ Алматинский Университет Энергетики и Связи
Республика Казахстан, 050013, Алматы, ул. Байтурсынова, 126

² АО «Трест Средазэнергомонтаж»
Республика Казахстан, 050004, Алматы, пр. Абылай хана, 56

³ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Российская Федерация, 11250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Поступила / Received 06.02.2019

Принята к печати / Accepted for publication 05.03.2019

Исследован кризис теплообмена при кипении воды в пористых структурах, используемых при охлаждении теплонапряженных поверхностей различных агрегатов применительно к энергетическим установкам электростанций. Эксперименты проводились на стенде с подводом теплоты от электронагревателя. Охлаждение теплообменных поверхностей осуществлялось подачей воды в пористые структуры с различными размерами ячеек. Показано, что в пористых системах охлаждения элементов теплоэнергоустановок протекают процессы кипения жидкости и при высоких тепловых потоках возможно наступление кризисной ситуации с перегревом теплообменной поверхности. Описаны процессы теплообмена, показано влияние теплофизических свойств поверхности теплообмена и определены оптимальные размеры ячеек пористых структур. Получено расчетное уравнение для определения критического теплового потока при высоких давлениях. Расчет величины критической нагрузки применительно к исследованным пористым структурам проводился с учетом недогрева и скорости потока, из которого следует, что недогрев жидкости позволяет несколько расширить теплопередающие возможности в пористой системе охлаждения. Представлено обобщение опытных данных исследованной капиллярно-пористой системы охлаждения, работающей при совместном действии капиллярных и массовых сил, и дано сравнение ее характеристик $q=f(\Delta T)$ с кипением в большом объеме, тепловыми трубами и тонкоплёночными испарителями. Приведены исследованные предельные возможности различных капиллярно-пористых покрытий. Высокая форсировка теплопередачи обеспечивается комбинированным действием капиллярных и массовых сил и имеет преимущества по сравнению с кипением в большом объеме, тонкоплёночными испарителями и тепловыми трубами. Показано, что результаты теоретических расчетов и экспериментальных данных хорошо согласуются.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кризис кипения, капиллярно-пористые структуры, размер ячеек, теплофизические свойства, поверхность теплообмена, системы охлаждения

Адрес для переписки:

Бондарцев Д. Ю.
АО «Трест Средазэнергомонтаж».
Республика Казахстан, 050004, Алматы, пр. Абылай хана, 56.
e-mail: d.bondartsev@saem.kz

Address for correspondence:

Bondartsev D. Yu.
JS «Trest Sredazenergomontazh».
Republic of Kazakhstan, 050004, Almaty, Abylai Khan Ave., 56.
e-mail: d.bondartsev@saem.kz

Для цитирования:

Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я. «Обобщение процессов теплопередачи и их сравнительная оценка для капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках» 2019. – Т. 12, №1. – С. 29–35.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-29-35>

For citation:

Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginsky A. Y.
[Summary of heat transfer processes and their comparative evaluation for capillary porous coatings in power plants].
Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no 1, pp. 29–35. (in Russian)
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-29-35>

Summary of heat transfer processes and their comparative evaluation for capillary porous coatings in power plants

Genbach A. A.¹, Bondartsev D. Yu.*², Shelginsky A. Y.³

¹ Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
Republic of Kazakhstan, 050013, Almaty, Baitursynov Street, 126

² JS «Trest Sredazenergomontazh»
Republic of Kazakhstan, 050004, Almaty, Abylai Khan Ave., 56

³ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Krasnokazarmennaya str. 14, 111250, Moscow, Russia

The crisis of heat exchange at boiling of water in porous structures used for cooling of heat-stressed surfaces of various aggregates is investigated. The study refers to thermal power installations of power plants. The experiments were carried out on a stand with heat supply from an electric heater. Cooling of heat-exchange surfaces was performed by water supply to porous structures with different cell sizes. It is shown that in porous cooling systems of elements of heat and power plants processes of fluid boiling take place, and at high heat flows it is possible to approach a crisis situation with overheating of the heat-exchange surface. The heat exchange processes are described, the influence of thermophysical properties of heat exchange surface is shown, and optimal sizes of porous structure cells are determined. A calculated equation is obtained for determining the critical heat flux at high pressures. The calculation of the critical load with respect to the examined porous structures was carried out with taking into account the underheating and flow rate, from which it follows that the underheating of the liquid enables to expand slightly the heat transfer capabilities in a porous cooling system. The experimental data of the investigated capillary porous cooling system operating under the joint action of capillary and mass forces are generalized, and its characteristics $q=f(\Delta T)$ are compared with boiling in large volume, heat pipes and thin-film evaporators. The limits of different capillary-porous coatings are given. High heat transfer boosting is provided by combined action of capillary and mass forces and has advantages in comparison with boiling in large volume, thin-film evaporators and heat pipes. It is shown that the results of theoretical calculations conform well with experimental data.

KEYWORDS: boiling crisis, capillary porous structures, cell size, thermal properties, heat exchange surface, cooling systems

Введение

Исследование различных факторов, влияющих на теплообмен в пористых структурах, показывает, что особый интерес вызывают предельные тепловые потоки, при которых наступает кризис кипения, приводящий к перегреву поверхности теплообмена и пористой структуры. В этом случае требуются знания величин тепловых потоков и термических напряжений с целью обеспечения надежной и долговечной работы установки.

Для поверхностей с пористым покрытием этот вопрос особенно актуален. Время роста пузыря в десятки раз меньше, чем в большом объеме. Значительно изменяются гидродинамические условия подпитки жидкостью. Паровая пленка при определенных условиях препятствует контакту жидкости с поверхностью теплообмена даже при большом избытке жидкости.

Постановка задачи исследования

Сложной задачей в различных энергетических установках является создание системы охлаждения высокотемпературных деталей и узлов. К ним можно отнести топочные экраны высокофорсированных котельных агрегатов, камеры сгорания, сопла и лопатки газотурбинных агрегатов [1–3].

В системах охлаждения протекают процессы пузыр-

чатого кипения жидкости (воды). При высоких тепловых нагрузках не исключается наступление кризисной ситуации с возможным перегревом теплообменной поверхности [4–8]. Для исследования кризиса кипения разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1.

Следует ожидать, что применительно к изучаемой пористой системе охлаждения величина удельного теплового потока, при котором наступает кризис кипения, $q_{кр}$, будет зависеть от недогрева и скорости потока. Недогрев жидкости позволит расширить теплопередающие возможности системы охлаждения. Поскольку процессы теплопередачи протекают в тонких пористых структурах, то даже незначительный избыток свободно стекающей пленки по внешней стороне структуры, определяемый параметром \tilde{m} при данном гидростатическом давлении ΔP_d и условном коэффициенте проницаемости K_y , создает ядро жидкости, из которого непрерывно будет подсасываться недогретый охладитель за счет разности температур и капиллярных сил [9–11].

Экспериментальная установка и условия проведения опытов

Установка (рисунок 1) имела искривленную поверхность и работала под высоким давлением. Установка позволяла изучить интегральные (средние) теплооб-

рины ячейки сетки (в десятки раз), как это имеет место в тепловых трубах, не замечено. Это можно объяснить тем, что при малых размерах ячеек при наличии гравитационных сил, высокое гидравлическое сопротивление не столь ограничивает расход жидкости, которая может частично стекать по сетчатой поверхности. В то же время повышенный размер ячеек не приводит к значительному уменьшению транспортной способности. Однако ширина ячейки сетки в рассматриваемой системе оказывает влияние на динамику развития паровых пузырей и, следовательно, на интенсивность теплообмена и величину $q_{кр}$. Протекание процесса пузыреобразования в отдельных (изолированных) ячейках, как это имело место в исследуемой системе, предотвращает преждевременное слияние паровых пузырей и образование сплошной паровой пленки.

Наличие крупных ячеек позволяет улучшить отвод легкой фазы от парогенерирующей поверхности. Однако увеличивать ячейки, начиная с ширины $0,4 \times 10^{-3}$ м, нецелесообразно, поскольку в таких ячейках, подобно кипению на технической поверхности без пористого покрытия, возникают паровые конгломераты.

Выводы

1. Проведены исследования кризиса теплообмена в зависимости от недогрева и скорости потока жидкости, теплофизических свойств поверхности нагрева и выброса капель жидкости из пористой структуры;
2. Получено расчетное уравнение для определения критического теплового потока;
3. Разработана экспериментальная установка и метод проведения экспериментальных исследований с использованием различных пористых структур;
4. Показано, что результаты теоретических расчетов и экспериментальных данных хорошо согласуются.
5. Определены принципы конструирования системы охлаждения поверхности с пористым покрытием;
6. Исследования имеют практическое значение для защиты от перегрева теплонапряженных поверхностей различных теплотехнических агрегатов.

Список использованных источников

1. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K. Investigation of a high-forced cooling system for the elements of heat power installations, *Journal of machine Engineering* 2018; (2): 106–117.
2. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K. Modelling of capillary coatings and heat exchange surfaces of elements of thermal power plants. *Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue G* 2018;: 133–139.
3. Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю. Разрушение капиллярно-пористых покрытий при интенсивном тепломассопереносе. «Деформация и разрушение материалов», РФ, Москва 2018; (10): 40–46.
4. Jamialahmadi M. et al., *Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures*, Intern. J Heat Mass Transfer, 51, 2482–2493. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052. 2008.
5. Ose Y., Kunugi T. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling,

Programme in Nuclear Science and Technology 2011; (2): 125–129.

6. Krepper E. et al., *CFD Modelling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design*, Nuclear Engineering and Design 2007; (7): 716–731.

7. Овсянник А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, Белоруссия 2012;: 284.

8. Alekseik O. S., Kravets V. Yu. Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2013; 4/8 (64): 26–31.

9. Jian Li, Fangjum Hong, Rongjian Xie, Ping Cheng. Pore scale simulation of evaporation in a porous wick of a loop heat pipe flat evaporator using Lattice Boltzmann method. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2019; (102): 22–33.

10. Kupetz M. Модернизация и продление срока эксплуатации паротурбинных электростанций в Восточной Европе и в России/ M. Kupetz, E. Jenikejew, F. Hiss. *Теплоэнергетика* 2014; (6): 35–43.

11. Гринь Е. А. Возможности механики разрушения применительно к задачам прочности, ресурса и обоснования безопасной эксплуатации тепломеханического энергооборудования. *Теплоэнергетика* 2013; (1): 25–32.

References

1. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K. Investigation of a high-forced cooling system for the elements of heat power installations, *Journal of machine Engineering* 2018; (2): 106–117.
2. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K. Modelling of capillary coatings and heat exchange surfaces of elements of thermal power plants. *Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue G* 2018;: 133–139.
3. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu. Destruction of capillary porous coatings at intensive heat and mass transfer. Deformation and destruction of materials, Moscow 2018; (10): 40–46. (In Russ.)
4. Jamialahmadi M. et al. *Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures*, Intern. J Heat Mass Transfer 2007.07.052. 2008.
5. Ose Y., Kunugi T. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling, Programme in Nuclear Science and Technology 2011; (2): 125–129.
6. Krepper E. et al. *CFD Modelling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design*, Nuclear Engineering and Design 2007; (7): 716–731.
7. Ovsyanik A. V. *Modelling of Processes of Heat Exchange at Boiling Liquids* (In Russ.), Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoy. Belarus 2012;: 284.
8. Alekseik O. S., Kravets V. Yu. Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2013; 4/8 (64): 26–31.
9. Jian Li, Fangjum Hong, Rongjian Xie, Ping Cheng. Pore scale simulation of evaporation in a porous wick of a loop heat pipe flat evaporator using Lattice Boltzmann method. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2019; (102): 22–33.
10. Kupetz M., Jeni Heiew E., Hiss F. Modernization and extension of the life of steam turbine power plants in Eastern Europe and Russia, *Heat power engineering* 2014; (6): 35–43. (In Russ.)
11. Grin E. A. 2013, The possibilities of fracture mechanics in relation to the problems of strength, resource and justification for the safe operation of thermal mechanical equipment, *Heat power engineering* 2013; (1): 25–32. (In Russ.)

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-36-44>
УДК 621.311.019.3 (075.8)+

Исследование эксплуатационных характеристик системы релейной защиты в условиях регулярных периодических проверок

Зеленцов Б. П., Трофимов А. С.*

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

ул. Кирова, 86, 630102, г. Новосибирск

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

пр-т К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск

Поступила / Received 15.01.2019

Принята к печати / Accepted for publication 25.02.2019

Приведена аналитическая модель функционирования релейной защиты энергосистем, в которой учтены такие виды отказов, как ложное срабатывание, излишнее срабатывание, отказ в срабатывании, а также дефекты, опасные с точки зрения излишнего срабатывания и отказа в срабатывании. Проверки работоспособности релейной защиты энергосистем проводятся с постоянным периодом. Перечисленные события можно разделить на две группы: случайные и регулярные. Наличие случайных и регулярных составляющих событий восстановления релейной защиты энергосистем возможно корректно учесть в рамках аппарата теории Марковских процессов. Модель основана на описании процесса функционирования релейной защиты линии электропередачи полумарковским процессом. Функционирование системы во времени представлено в виде циклов. Цикл функционирования системы состоит из подмножества, где система функционирует и проверяется, и подмножества, в котором она восстанавливается. Модель реализована в графе с 9 состояниями. Вероятности событий описывают процесс смены состояний на дискретном множестве состояний релейной защиты линии электропередачи. Вероятности смены состояний являются исходными характеристиками полумарковского процесса. С помощью этой модели получена зависимость показателей эксплуатации и надёжности от периодичности регулярных проверок. Установлено, что периодичность проверок с показательным законом распределения завышает значение коэффициента неготовности, так как время наступления периодической проверки больше, чем математическое ожидание заданной величины периодической проверки при случайном законе распределения. При значительном времени между проверками либо отсутствии периодических проверок коэффициент неготовности стремится к значению, которое не зависит от способа задания времени между периодическими проверками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: релейная защита энергосистем, отказы релейной защиты, модель функционирования системы релейной защиты, показатели эксплуатации и надёжности релейной защиты

Адрес для переписки:

Трофимов А. С.

ФГБОУ ВО «НГТУ», кафедра ЭлСт,

пр-т К.Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия,

e-mail: a.trofimov@corp.nstu.ru

Address for correspondence:

Trofimov A. S.

Novosibirsk State Technical University, Department Power stations,

K. Marksa str., 20, 630073, Novosibirsk, Russia,

e-mail: a.trofimov@corp.nstu.ru

Для цитирования:

Зеленцов Б. П., Трофимов А. С. Исследование эксплуатационных характеристик системы релейной защиты в условиях регулярных периодических проверок. Надежность и безопасность энергетики. 2019. – Т. 12, №1. – С. 36–44.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-36-44>

For citation:

Zelentsov B. P., Trofimov A. S. [Study of functioning of relay protection system under regular check conditions]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 36–44 (in Russian). <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-36-44>

Study of functioning of relay protection system under regular check conditions

Zelentsov B. P., Trofimov A. S.*

Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences

Kirova str., 86, 630102, Novosibirsk, Russia

Novosibirsk State Technical University

K. Marksa str., 20, 630073, Novosibirsk, Russia

An analytical model of the operation of the relay protection of power systems is presented, which takes into account such types of failures as unwanted operation, failure to operate, as well as defects dangerous from the point of view of unwanted operation and failure to operate. Operability checks of relay protection of power systems are conducted with a constant period. The listed events can be divided into two groups: random and regular ones. The presence of random and regular components of events of recovery of relay protection of power systems can be correctly taken into account in the framework of the apparatus of the theory of Markov processes. The model is based on the description of the process of operation of relay protection of power transmission line by a semi-Markov process. The functioning of the system in time is presented in the form of cycles. The cycle of the functioning of the system consists of a subset, where the system is functioning and verified, and a subset, in which it is restored. The model is implemented in a graph with 9 states. Probabilities of events describe the process of changing states on a discrete set of states of relay protection of the power system. The probability of a change of states is the initial characteristic of a semi-Markov process. This model has enabled to obtain the dependence of operation and reliability parameters on the frequency of regular checks. It is established that the frequency of regular checks with the exponential distribution law overstates the value of the unavailability factor, since the time of the onset of a periodic check is greater than the mathematical expectation of a given value of the periodic check under a random distribution law. With a significant time between checks, or in absence of periodic checks, the unavailability factor tends to a value that does not depend on the way of setting the time between periodic checks.

KEYWORDS: relay protection of power systems, failures of relay protection system, model of operation of relay protection system, relay protection operation and reliability parameters

1. Введение

Основным назначением релейной защиты (РЗ) является автоматическое отключение повреждённого элемента (как правило, при коротком замыкании (КЗ)) от остальной, неповреждённой части энергосистемы при помощи выключателей. Таким образом, РЗ является одним из видов автоматики энергосистем, важность которой определяется тем, что без неё невозможна бесперебойная работа электроэнергетических установок.

Оборудование системы РЗ относится к системам длительного использования и обладает такими особенностями сложных систем, как большое число элементов различного назначения, высокая степень их связанности, возможность отказов разного вида, которые приводят к разным последствиям и др. Проблема обеспечения требуемой эффективности средств РЗ определяется их назначением и сложностью [1].

Одной из проблем обеспечения надёжности и эффективности систем РЗ является построение таких моделей, которые пригодны для теоретического и экспериментального изучения их свойств. Математическое моделирование позволяет определять структуру системы РЗ при её проектировании, производить модернизацию систем, находящихся в эксплуатации и совершенствовать систему обслуживания систем РЗ.

В [2] рассмотрена аналитическая модель функционирования системы РЗ в непрерывном времени, в которой все события, приводящие к смене состояний, яв-

ляются случайными с показательным распределением времени до этих событий. В отличие от этой модели в данной статье время между проверками регламентировано, то есть проверки проводятся с постоянной периодичностью. Кроме того, здесь учтены три вида отказов. На основе этой модели исследована зависимость показателей эксплуатации и надёжности системы РЗ от периодичности регулярных проверок.

2. Функционирование системы релейной защиты

Надёжность в соответствии с разделением функций РЗ делится на надёжность срабатывания при внутренних КЗ и надёжность несрабатывания при внешних КЗ и режимах без КЗ [3]. В соответствии с этим стандартом определяются понятия надёжности несрабатывания и надёжности срабатывания. Невыполнение защитой требуемых функций может заключаться в непредусмотренном функционировании, например, ложное срабатывание либо в отказе в функционировании РЗ [3]. При этом целесообразно использовать такой показатель надёжности, который учитывал бы все виды отказов. Таким показателем является коэффициент неготовности.

Процесс функционирования РЗ заключается во взаимодействии различных событий с системой РЗ, таких как, дефекты в схемах РЗ, внутренние и внешние КЗ, регулярные проверки и восстановления и т. д. В результате такого взаимодействия система РЗ может находиться в различных состояниях. Обычно существует однознач-

На рисунке 3 приведена зависимость коэффициента неготовности K_n от периодичности проверок при регулярных проверках и таких же значениях среднего времени при случайной периодичности.

При изменении периодичности регулярных проверок от 1 года до 12 лет коэффициент неготовности изменяется от 0,003 до 0,026, то есть изменяется на величину 0,023. Изменение доли времени нахождения в неработоспособном состоянии увеличивается на 2,3%. Аналогичный результат при изменении среднего времени между проверками при показательном распределении времени между проверками: коэффициент неготовности увеличивается на 1%. Видно также, что при возрастании времени между периодическими проверками заданным фиксированным значением и средним значением имеет место асимптотическое сближение коэффициентов неготовности. При $T \rightarrow \infty$ коэффициент неготовности стремится к значению 0,0416 независимо от способа задания времени между периодическими проверками.

8. Заключение

Разработана модель функционирования системы РЗ в условиях регулярных периодических проверок. С помощью данной модели установлено, что при изменении периодичности проверок от одного года до двенадцати лет коэффициент неготовности увеличивается в 8–10 раз. При возрастании T рост значения K_n замедляется и при отсутствии периодических проверок коэффициенты неготовности выравниваются независимо от способа задания времени между периодическими проверками.

Периодичность проверок с показательным законом распределения завышает значение коэффициента неготовности. Это связано с тем, что время наступления периодической проверки больше, чем математическое ожидание заданной величины периодической проверки при случайном законе распределения. Для приближения характеристик надёжности к реальному процессу эксплуатации систем РЗ, а именно при строгой регламентации проведения периодической проверки, требуется корректировка ранее разработанной модели функционирования системы РЗ.

На основе приведённой модели могут быть скорректированы требования к периодичности регулярных

Таблица 4. Значения показателей эксплуатации и надёжности при разных значениях установленного интервала между проверками

Table 4. The values of operation and reliability indicators for different values of the set interval between inspections

T, T_{cp}	$T = const$				$T_{cp} = 1 / \lambda_n$			
	K_n	ω_s (1/год)	ω_n (1/год)	t_{UV} (год)	K_n	ω_s (1/год)	ω_n (1/год)	t_{UV} (год)
1	0.00311	0.1153	0.926	8.676	0.03062	0.118	0.999	8.456
2	0.00703	0.1102	0.417	9.077	0.03527	0.118	0.499	8.496
3	0.01035	0.1064	0.252	9.398	0.03716	0.117	0.333	8.513
4	0.01315	0.1036	0.172	9.652	0.03818	0.117	0.250	8.522
5	0.01556	0.1016	0.126	9.846	0.03882	0.117	0.199	8.528
6	0.01767	0.1001	0.096	9.992	0.03926	0.117	0.167	8.532
7	0.01953	0.0991	0.077	10.095	0.03957	0.117	0.143	8.536
8	0.02119	0.0984	0.062	10.162	0.03982	0.117	0.125	8.537
9	0.02270	0.0980	0.051	10.199	0.04001	0.117	0.111	8.538
10	0.02407	0.0979	0.043	10.213	0.04016	0.117	0.100	8.541
11	0.02532	0.0979	0.036	10.206	0.04029	0.117	0.091	8.542
12	0.02648	0.0982	0.031	10.182	0.04039	0.117	0.083	8.542

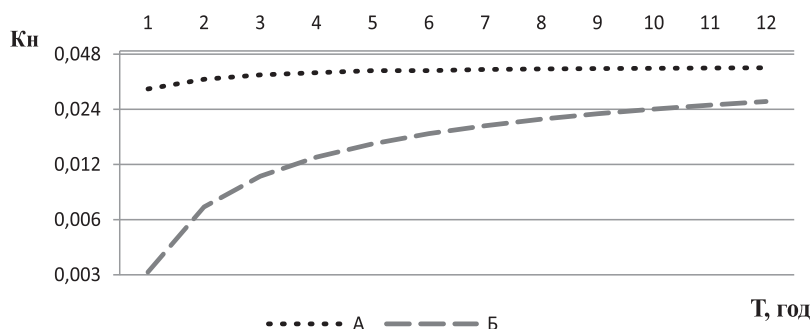


Рисунок 3. Зависимость коэффициента неготовности от интервала между проверками: А) при среднем времени между проверками T_{cp} [2]; Б) при регулярных проверках с периодичностью T

Figure 3. Dependence of the unavailability factor on the interval between checks: А) with an average time between checks T_{cp} [2]; Б) with regular inspections at regular intervals T

проверок, которые обеспечивают необходимый уровень надёжности при соответствующих эксплуатационных затратах.

Список использованных источников

- Дьяков А. Ф., Стенников В. А., Сендеров С. М. и др.; отв. ред. Воропай Н. И. Надёжность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения. Новосибирск: Наука 2014.; 284.
- Трофимов А. С., Зеленцов Б. П. Модель функционирования релейной защиты энергосистем. ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение 2016; (6): 110–114.
- Защита энергетических систем. Международный стандарт IEC 60050-448. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=448> (дата обращения: 04.02.2019).
- Правила технического обслуживания устройств релейной

защиты и электроавтоматики электрических сетей 0,4–35 кВ. РД 153-34.3-35.613-00.

5. Кельберт М. Я., Сухов Ю. М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов. – М.: МЦНМО 2017.

6. Зеленцов Б. П. Частотный метод моделирования вероятностных систем длительного использования. Вестник СибГУТИ 2016; (4): 25–38.

7. Надёжность в технике. Термины и определения. ГОСТ Р 53480–2009.

8. Birolini Alessandro, Reliability Engineering: Theory and Practice. Berlin; Springer; 8th ed., 2017; 651.

9. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики. Методические указания по расчёту надёжности. СТО 34.01-4.1-008-2018.

10. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, автоматики, дистанционного управления и сигнализации на объектах электросетевого комплекса. СТО 34.01-4.1-005-2017.

References

1. Dyakov A. F., Stennikov V. A., Sender S. M. and etc.; отв. ред. Voropay N. I. Reliability of energy systems: Problems, models and methods for their solution. Novosibirsk: Nauka 2014; 284. (In Russ.)

2. Trofimov A. S., Zelentsov B. P. The model of the relay protection of power systems // ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredeleniye. 2016; (6): 110–114. (In Russ.)

3. Power system protection. International Standart IEC 60050-448. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=448> (дата обращения: 04.02.2019). (In Eng.)

4. Rules for maintenance of relay protection devices and electrical automation of electrical networks 0,4–35 kV. RD 153-34.3-35.613-00. (In Russ.)

5. Kelbert M. J., Suchov Y. M. Probability and statistics in examples and problems. C. II: Markov chains as a starting point of the theory of random processes. – М.: MZNMО 2017. (In Russ.)

6. Zelentsov B. P. Frequency method for modeling long-term probability systems. Vestnik SIBSUTIS 2016; (4): 25–38. (In Russ.)

7. Reliability in technology. Terms and Definitions. GOST R 53480–2009. (In Russ.)

8. Birolini Alessandro, Reliability Engineering: Theory and Practice. Berlin; Springer; 8th ed., 2017; 651. (In Eng.)

9. Microprocessor devices of relay protection and automation. Methodical instructions on the calculation of reliability. STO 34.01-4.1-008-2018. (In Russ.)

10. Rules of maintenance of relay protection, automation, remote control and alarm systems at the facilities of the power grid complex. STO 34.01-4.1-005-2017. (In Russ.)



<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-45-49>

УДК 620.92

Целесообразность замены водяного отопления на воздушное с использованием тепловых насосов

Мартынов А. В., Кутко Н. Е.*

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
ул. Красноказарменная, 14, 111250, г. Москва, Россия

Поступила / Received 12.10.2018

Принята к печати / Accepted for publication 05.03.2019

Рассмотрена целесообразность замены водяного отопления и перехода на воздушное отопление, которое может осуществляться с использованием тепловых насосов (ТН) типа «воздух-воздух». Отсутствие водяных трубопроводов повышает надежность систем отопления. Кроме повышенной надежности, теплонасосные системы обеспечивают комфортные условия потребителям в межсезонные периоды, когда централизованное водяное отопление отключается.

В ТН типа «воздух-воздух» в качестве низкопотенциального источника тепла (НПИТ) используется воздух окружающей среды. При низких температурах воздуха коэффициент трансформации μ составляет около 2-х, при повышении температуры воздуха μ возрастает до 3÷4, что обеспечивает высокую экономичность систем отопления на базе тепловых насосов. Отопительный сезон, как правило, можно разбить на два периода. Один период характеризуется наиболее высокими температурами воздуха окружающей среды ($-5\div 8^{\circ}\text{C}$). Этот период весьма продолжительный и при теплых зимах может составлять около 4000 часов за отопительный период и более. В этот период тепловой насос работает эффективно при коэффициенте трансформации более 4.

Другой период, когда температура окружающей среды опускается ниже $-10\div -20^{\circ}\text{C}$, длится, как правило, небольшое количество часов, которое от общего количества часов отопительного периода составляет около 15÷18%. В этот период эффективность теплового насоса уменьшается до $\mu=1,9\div 2$. Однако и при такой эффективности тепловой насос выдает в 2 раза больше тепла, чем потребляет электроэнергию.

Таким образом, в регионах с длительным периодом стояния температур $-5\div 8^{\circ}\text{C}$ в отопительный сезон воздушное отопление на базе ТН может быть предпочтительнее водяного отопления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Воздушное отопление, тепловой насос, коэффициент трансформации, надежность, комфортность, кондиционирование

Адрес для переписки:

Кутко Н. Е.
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», кафедра ПТС,
ул. Красноказарменная, 14, 111250, г. Москва, Россия,
e-mail: KutkoNY@mpei.ru

Address for correspondence:

Kutko N. E.
Moscow Power Engineering Institute, Department IHES,
Krasnokazarmennaya str., 14, 111250, Moscow, Russia,
e-mail: KutkoNY@mpei.ru

Для цитирования:

Мартынов А. В., Кутко Н. Е. Целесообразность замены водяного отопления на воздушное с использованием тепловых насосов. Надежность и безопасность энергетики. 2019. – Т. 12, №1. – С. 45–49.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-45-49>

For citation:

Martynov A. V., Kutko N. E. [Expediency of substitution of water heating with air heating involving use of heat pumps]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 45–49. (in Russian)
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-45-49>

Expediency of substitution of water heating with air heating involving use of heat pumps

Martynov A. V., Kutko N. E.*

*National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI)
Krasnokazarmennaya str., 14, 111250, Moscow, Russia*

Expediency is considered of substitution of water heating and transition to air heating that can be implemented with “air-air” type heat pumps (HP). The absence of water pipelines raises the reliability of heating systems. In addition to improved reliability, heat pumping systems ensure comfortable conditions for consumers at intervals between the heating seasons, when the central water heating is disabled.

The “air-air” type HP use the ambient air as a low-grade heat source (LGHS). At low air temperatures, transformation ratio μ is about 2 and would rise to 3÷4 at higher air temperatures, which ensures high cost-efficiency of heating systems based on heat pumps. The heating season can generally be divided into two periods. One of the periods is characterized by the highest ambient air temperatures ($-5\div 8^{\circ}\text{C}$). This period is rather long and, in warmer winters, can last for about 4000 hours per heating season, or longer. This is the period, when the heat pump operates efficiently at a transformation ratio above 4.

The other period, when the ambient temperature falls below $-10\div -20^{\circ}\text{C}$, generally lasts for a small number of hours, which makes about 15÷18% of the total duration of the heating season. At this period, the efficiency of the heat pump would decrease to $\mu=1.9\div 2$. Yet, even with such an efficiency, a heat pump delivers twice as much heat as the electric power it consumes.

Therefore, in regions with a long period of temperatures within the range of $-5\div 8^{\circ}\text{C}$ during a heating season, air heating based on HP can be advantageous compared to water heating.

KEYWORDS: Air heating, heat pump, transformation ratio, reliability, comfort, air conditioning

Неравномерное распределение водных ресурсов на Земле приводит к постоянным конфликтам между различными странами. Так, в Кейптауне при населении около 4 млн. человек не хватает воды даже на питье и умывание. Существуют предположения, что третья мировая война может произойти из-за установления монополии на пресную воду. Одной из затратных систем по расходу воды является система централизованного теплоснабжения [1].

Системы централизованного теплоснабжения базируются на большом количестве разветвленных сетевых трубопроводов, которые должны постоянно пополняться водой, особенно при авариях на тепловых сетях. Колоссальное количество воды утекает из труб, что приводит к необходимости увеличивать расход воды с большими экономическими затратами.

Одним из способов экономии воды является полный отказ от водяного теплоснабжения с переходом на воздушное теплоснабжение общественных и административных зданий, таких как школы, больницы, офисы, торговые центры и т. д. [2]. Так, например, в Канаде широко применяется воздушное отопление.

При отказе от централизованного теплоснабжения необходимо переходить на автономное теплоснабжение зданий. Одним из вариантов автономного теплоснабжения являются системы с ТН [3–10].

Для обеспечения зданий воздушным теплоснабжением необходимо использовать ТН типа «воздух-воздух». В качестве НПИТ целесообразно применять атмосферный воздух. Кроме атмосферного воздуха, в качестве НПИТ можно использовать воздух горячих цехов металлургических заводов и промышленных предприя-

тий, вентиляционный воздух из вентиляционных каналов различных зданий, а также компрессорных цехов, где от работающих компрессоров при их охлаждении образуется нагретый воздух.

Системы воздушного отопления являются комбинированными, так как воздух, подаваемый для отопления, является вторичным теплоносителем, нагревающимся в воздухонагревателях — в конденсаторах тепловых насосов. Воздух, нагретый до температуры более высокой, чем температура воздуха в помещении, отдает избыток тепла и, охладившись, отводится из помещения или возвращается для повторного нагрева.

Процесс может осуществляться двумя путями: нагретый воздух, попадая в обогреваемое помещение, смешивается с внутренним воздухом или нагретый воздух может перемещаться в каналах, окружающих помещение, нагревая стенки каналов. Однако второй способ не получил широкого применения.

Преимущества воздушного отопления заключаются в обеспечении равномерности температуры в плане помещения, а также в возможности очистки и увлажнения воздуха, отсутствии отопительных приборов и практически в тепловой безинерционности.

Однако имеются и недостатки: большие поперечные сечения воздухопроводов и существенные трансмиссионные потери тепла при недостаточной теплоизоляции воздухопроводов.

Если радиус действия системы сужается до помещения и воздухонагреватель устанавливается в одном помещении, то она становится местной.

Чисто отопительная с полной рециркуляцией воздуха местная система может быть бесканальной и ка-

Список использованных источников

1. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. Издательство МЭИ. Москва 2001;: 472.
2. Энергосбережение в учреждениях РАН: Сборник научно-практических и научно методических материалов./ Под общ. ред. акад. Фортова В. Е. – М., "Амипресс" 2001.
3. Малкин В. А. Тепловые насосы большой мощности на юге России. Энергосовет 2016;: 2(44): 67–71.
4. Федосеев В. Н., Зайцева И. А., Андреева О. Р., Острякова Ю. Е., Целовальникова Н. В. Оценка энергоэффективности работы воздушного теплового насоса на фреоне. Международный научно-исследовательский журнал 2016; 11–4 (53): 130–135.
5. Петраков Г. Н., Строгней В. Н., Мартынов А. В. «Применение тепловых насосов в теплоснабжении», Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский гос.техн. университет» 2007;: 259.
6. Огуречников Л. А. Энергетическая и экономическая эффективность теплонасосного воздушного отопления. Холодильная техника 2015; 11: 43–47.
7. Гашо Е. Г., Козлов С. А., Пузаков В. С. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре Москва 2017;: 203.
8. Воздушные тепловые насосы: Издательский центр «Аква-Терм»; Москва 2012;: 110.
9. Петросян А. П. Применение воздушных тепловых насосов для отопления зданий. Энергосбережение 2015; (4): 54–61.
10. Гусева Е. Я., Королева Н. А. Энергоэффективность в системах кондиционирования воздуха с примени-

ем испарительного охлаждения, С.О.К. 2018; (8): 74–77.

References

1. Sokolov Ye. Ya. Cogeneration and heat supply systems. MPEI Publishing House. Moscow 2001;: 472.
2. Power-saving in the RAS institutions: Collection of practical science and methodological materials./ Under general editorship of Acad. Fortov V. Ye. – M., "Amipress" 2001. (In Russ.)
3. Malkin V. A. High capacity heat pumps in the south of Russia. Energosovet. 2016;: 2(44): 67–71. (In Russ.)
4. Fedoseyev V. N., Zaytseva I. A., Andreyeva O. R., Ostryakova Yu. Ye., Tselovalnikova N. V. Assessment of energy efficiency of freon-based air heat pump. International Research Journal. 2016; 11–4 (53): 130–135. (In Russ.)
5. Petrakov G. N., Strogney V. N., Martynov A. V. Application of heat pumps in heat supply. Voronezh: GOU VPO Voronezh State Technical University. 2007;: 259. (In Russ.)
6. Ogurechnikov L. A. Energy and cost efficiency of heat pump air heating. Kholodilnaya Tekhnika. 2015; 11: 43–47. (In Russ.)
7. Gasho Ye. G., Kozlov S. A., Puzakov V. S. Heat pumps in modern industry and utility infrastructure. Moscow, 2017;: 203. (In Russ.)
8. Air heat pumps: Aqua-Therm Publishing House; Moscow, 2012;: 110.
9. Petrosyan A. P. Application of air heat pumps for heating supply of buildings. Energoberezhniye. 2015; (4): 54–61. (In Russ.)
10. Guseva Ye. Ya., Korolyova N. A. Energy efficiency in air conditioning systems involving use of evaporative cooling, C.O.K. 2018; (8): 74–77. (In Russ.)



<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-50-55>

УДК 66.045.53+621.175

Определение эффективности очистки газов от дисперсной фазы и модернизация скрубберов высокоэффективными насадками

Лаптев А. Г.*, Фарахов Т. М., Башаров М. М.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

ул. Красносельская, 51, 420066, г. Казань, Россия

Поступила / Received 22.11.2018

Принята к печати / Accepted for publication 14.02.2019

Рассмотрено решение задачи моделирования очистки дымовых и технологических газов от тонкодисперсной фазы на предприятиях энергетики и нефтегазохимического комплекса с применением колонных аппаратов с новыми высокоэффективными хаотичными и регулярными насадками. Показано применение диффузионной и ячеечной моделей структуры потока для расчета профиля концентрации осаждающихся частиц на пленку жидкости в аппаратах с различными насадками. Учет осаждения тонкодисперсных частиц из газов на межфазную поверхность стекающей по насадке пленки жидкости осуществляется с применением объемного источника массы. Принята модель турбулентно-инерционного осаждения частиц. Основными параметрами моделей являются коэффициент турбулентной миграции частиц к поверхности пленки на контактных устройствах, модифицированное число Пекле с коэффициентом обратного перемешивания и число ячеек полного перемешивания. Данный подход может быть обобщен на широкий класс пленочных аппаратов мокрой очистки газов с целью их проектирования или выбора вариантов модернизации. Получены выражения для расчета эффективности сепарации аэрозолей на насадки, а также требуемая высота слоя насадки при заданной эффективности.

Представлены результаты расчетов эффективности очистки газов от аэрозолей с применением в скрубберах различных типов насадок, а также требуемой высоты слоя насадок при заданной эффективности. Дана графическая зависимость мощности, затрачиваемой на газоочистку в аппаратах с различными насадками. Показаны результаты решения производственной задачи очистки пирогаза от кокса и смол циркуляционной водой в модернизированном скруббере с новыми высокоэффективными насадками.

Представлены выражения для расчета коэффициента скорости турбулентной миграции частиц для хаотичных и регулярных насадок, а также модифицированных чисел Пекле. Отличительной особенностью данных выражений является расчет на основе известного гидравлического сопротивления контактных устройств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: газоочистка, аэрозоли, насадки, эффективность, энергозатраты

Благодарности

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (№13.6384.2017/БЧ): «Теоретические основы моделирования интенсифицированных процессов разделения и очистки смесей в нефтехимии и энергетике» (2017–2019 гг.).

Адрес для переписки:

Лаптев Анатолий Григорьевич
ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет,
ул. Красносельская д. 51, 420066 г. Казань, Россия,
e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Address for correspondence:

Anatoly Grigorievich Laptev
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya Str., Kazan 420066, Russia,
e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Для цитирования:

Лаптев А. Г., Фарахов Т. М., Башаров М. М. Определение эффективности очистки газов от дисперсной фазы и модернизация скрубберов высокоэффективными насадками. Надежность и безопасность энергетики. 2019. – Т. 12, №1. – С. 50–55.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-50-55>

For citation:

Laptev A. G., Farakhov T. M., Basharov M. M. [Determining efficiency of removal of dispersed phase from gases and modernization of scrubbers using high-performance packings]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 50–55 (in Russian).
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-50-55>

Determining efficiency of removal of dispersed phase from gases and modernization of scrubbers using high-performance packings

Laptev A. G.*, Farakhov T. M., Basharov M. M.

Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya Str., Kazan 420066, Russia

A solution to the problem of modeling the removal of a finely dispersed phase from stack gases and process gases at power engineering and petrochemical enterprises using a column apparatus filled with new highly efficient random and structured packings is considered.

The use of diffusion and cell models of the flow structure for calculating a concentration profile of particles settling on a liquid film in apparatuses filled with various packings is shown. Accounting for the deposition of finely dispersed particles from gases on the interfacial surface of the liquid film flowing down along the packing is carried out using a bulk source of mass. The model of turbulent-inertial sedimentation of particles is adopted. The main parameters of the model are the coefficient of turbulent migration of particles to the film surface on contact devices, a modified Peclet number with a backmixing coefficient, and the number of complete mixing cells. This approach can be generalized to a wide class of film-type apparatuses for wet gas cleaning with the aim of designing them or choosing modernization options. Expressions are obtained for calculating the efficiency of aerosol separation on packings as well as the required depth of the packed bed for a given efficiency.

Results of calculating the efficiency of gas purification from aerosols with the use of various types of packings in scrubbers as well as the required depth of the packed bed for a given efficiency are presented. A graphical dependence of the power spent on gas cleaning in apparatuses with different packings is given. Results of solving the production problem of cleaning pyrogas from coke and tar by circulating water in a modernized scrubber with new high-performance packings are shown.

Expressions for calculating the rate of turbulent particle migration for random and structured packings as well as modified Peclet numbers are presented. A distinctive feature of these expressions is the calculation based on the known hydraulic resistance of contact devices.

KEYWORDS: gas cleaning, aerosols, packings, efficiency, energy expenditures

Acknowledgments:

The paper is prepared within the basic part of the government assignment in the field of scientific research (No.13.6384.2017/BC): "Theoretical foundations for simulation of intensified processes of separation and treatment of mixtures in petrochemistry and power engineering" (2017–2019).

Введение

Математическое моделирование и аппаратное оформление процессов мокрого охлаждения и очистки дымовых и технологических газов является актуальной и важной задачей для различных предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Для очистки и охлаждения газов в зависимости от производственных условий используются распыливающие, вихревые, тарельчатые аппараты, а также скрубберы Вентури и скрубберы с насадками. В связи с разнообразными условиями работы аппаратов, повышением требований к энерго- и ресурсосбережению, надежности оборудования и экологической безопасности производств отечественными и зарубежными исследователями разрабатываются усовершенствованные методы расчетов процессов охлаждения и очистки газов, а также новые или модернизированные конструкции аппаратов [1–3].

В скрубберах сплошной фазой является газовый поток, в котором находится значительное количество дисперсных включений — твердых частиц, капель, струй и пленок жидкости. Точное описание явлений переноса

на уровне отдельных дисперсных включений представляется невозможным вследствие большого числа этих включений и неизвестной площади распределения контакта фаз в пространстве. Однако при практических расчетах представляют интерес только некоторые осредненные величины. При моделировании двухфазных потоков существует подход, основанный на составлении макроскопического баланса и осреднения локальных однофазных уравнений сохранения и условий сопряжения на границе с использованием источниковых членов межфазного переноса. При этом, согласно модели Р. И. Нигматуллина, Х. А. Рахматуллина и др., источниковые члены межфазного переноса выражаются через макроскопические определенные переменные.

Для расчета физических полей и эффективности проводимых процессов в промышленных аппаратах наибольшее применение получили различные модели структуры потоков [4, 5]. В таких моделях используются средние скорости фаз, а неравномерности распределения полевых переменных учитываются за счет коэффициентов продольного (обратного) и поперечного перемешивания. В такой постановке основная задача моделирования двухфазных течений сводится к экспе-

ности сепарации мелких капель от их диаметра при фиксированной скорости газа и высоты слоя насадки. Наибольшая эффективность обеспечивается с применением хаотичной насадки "Инжехим 2012".

С точки зрения энергозатрат наиболее предпочтительными являются насадки "Инжехим 2012" ($a_v = 420 \text{ м}^2/\text{м}^3$) и спирально-призматическая (рисунок 4).

С использованием представленной математической модели и современных насадок решена производственная задача охлаждения и очистки пирогаза от кокса и смол в модернизированном насадочном скруббере в производстве этилена. До модернизации аппарат диаметром 3,2 м, был оснащен уголковыми (проваль-

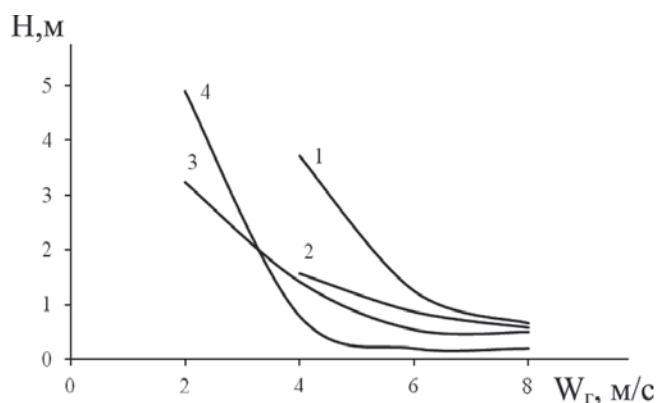


Рисунок 2. Зависимость требуемой высоты слоя нерегулярных насадок при $\eta = 0,985$ и $d_p = 5 \text{ мкм}$. 1 — металлические кольца Рашига (15x15) ($a_v = 350 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 2 — насадка "Инжехим" 2012 ($a_v = 420 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 3 — "Инжехим 2012" ($a_v = 650 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 4 — спирально-призматическая насадка ($a_v = 3300 \text{ м}^2/\text{м}^3$)

Figure 2. Dependence of the required depth of bed of random packings at $\eta = 0.985$ and $d_p = 5 \text{ μm}$. 1 — metal Raschig rings (15x15) ($a_v = 350 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 2 — "Inzhexim-2012" packing ($a_v = 420 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 3 — "Inzhexim-2012" packing ($a_v = 650 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 4 — spirally prismatic packing ($a_v = 3300 \text{ м}^2/\text{м}^3$)

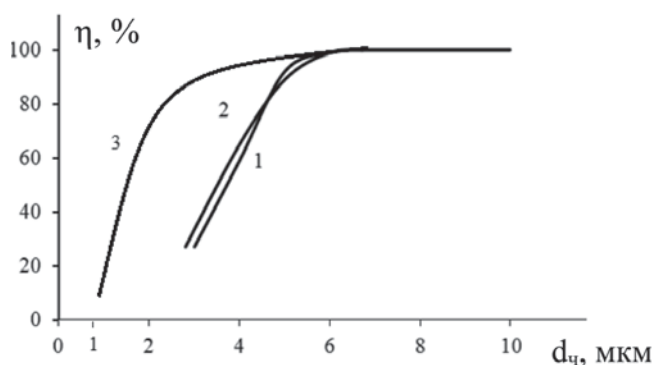


Рисунок 3. Зависимость эффективности сепарации аэрозольных частиц от их диаметра для насадки: 1 — РГН-5 ($a_v = 360 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 2 — «Инжехим-2002» ($a_v = 200 \text{ м}^2/\text{м}^3$) 3 — «Инжехим 2012» ($a_v = 420 \text{ м}^2/\text{м}^3$). Скорость газа $W_g = 8 \text{ м/с}$; высота слоя $H = 1,0 \text{ м}$

Figure 3. Dependence of efficiency of aerosol particles separation on their diameter for the packings: 1 — structured roll-type packing RGN-5 ($a_v = 360 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 2 — "Inzhexim-2002" ($a_v = 200 \text{ м}^2/\text{м}^3$) 3 — "Inzhexim-2012" ($a_v = 420 \text{ м}^2/\text{м}^3$). Gas velocity $W_g = 8 \text{ м/с}$; packed bed depth $H = 1.0 \text{ m}$

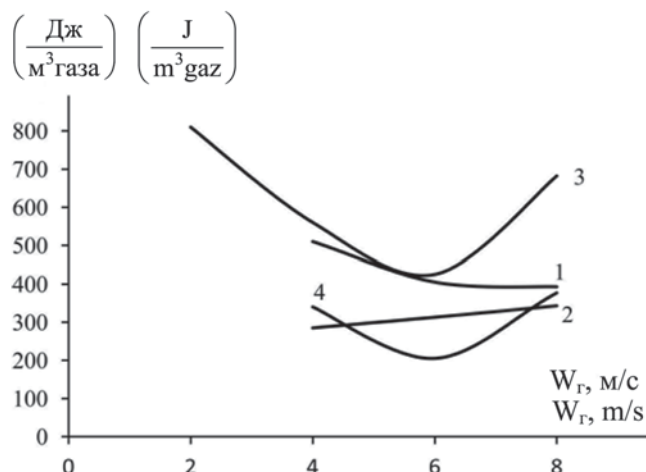


Рисунок 4. Удельные энергозатраты на очистку газа от частиц 5 мкм в нерегулярных насадках. Обозначения на рисунке 2

Figure 4. Specific energy consumption for removal of 5-micron particles from the gas in random packings. Designations are given in Figure 2

ными) тарелками в средней части (7 тарелок) и клапанными тарелками в верхней части (7 тарелок). Скруббер орошается водой с плотностью орошения около $20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ в верхней части до $80 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ в средней. Расход пирогаза 70 т/час , давление в колонне $0,6 \text{ кгс/см}^2$.

В связи с плановым повышением производительности установки газоразделения на 50–70% потребовалась модернизация скруббера путем замены тарелок на насадки.

В средней части размещена регулярная насадка IRG ("Инжехим") с удельной поверхностью $a_v = 165 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и свободным объемом $\epsilon_{св} = 0,98$, а в верхней части — хаотичная насадка "Инжехим 2012" с $a_v = 70 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и $\epsilon_{св} = 0,96$. Насадки металлические с искусственной шероховатостью поверхности [9]. Модернизация скруббера обеспечила повышение производительности по пирогазу и заданную эффективность газоочистки (не менее 97–98%) для частиц $\geq 3 \text{ мкм}$. Таким образом, подтверждена адекватность математической модели сепарации частиц и правильность научно-технических решений по модернизации скрубберов.

Представленную математическую модель и рассмотренные насадки можно использовать при решении аналогичных задач очистки газов на предприятиях ТЭК.

Список использованных источников

1. Зиганшин М. Г., Колесник А. А., Зиганшин А. М. Проектирование аппаратов пылеочистки: учебное пособие. 2-е изд. перераб. и доп. Санкт-Петербург: Издательство Лань 2014; 544.
2. Дмитриев А. В., Макушева О. С., Каллимулин И. Р., Николаев А. Н. Вихревые аппараты для очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий. Экология и промышленность России 2012; (1): 4–7.
3. Войнов Н. А., Жукова О. П., Кожухова Н. Ю., Богаткова А. В. Вихревое контактное устройство для очистки газо-

вых выбросов. Химия растительного сырья 2018; (2): 217–223.

4. Комиссаров Ю. А. Гордеев Л. С., Вент Д. П. Основы конструирования и проектирования промышленных аппаратов. Москва: Издательство Юрайт 2017; 368.

5. Разинов А. И., Клинов А. В., Дьяконов Г. С. Процессы и аппараты химической технологии. Казань: КНИТУ 2017; 860.

6. Башаров М. М., Лаптев А. Г. Эффективность насадочных газосепараторов и сетчатых демистеров на предприятиях ТЭК. Надежность и безопасность энергетики 2016; (3): 57–60.

7. Лаптев А. Г., Башаров М. М., Лаптева Е. А., Фарахов Т. М. Модели и эффективность процессов межфазного переноса. Часть 1. Гидромеханические процессы. Казань: Центр инновационных технологий 2017; 392.

8. Дмитриев А. В., Зинуров В. Э., Дмитриева О. С., Нгуен Ву Л. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах. Вестник Иркутского государственного технического университета 2018; 22 (3): 138–144.

9. Кagan А. М., Лаптев А. Г., Пушнов А. С., Фарахов М. И. Контактные насадки промышленных теплообменников аппаратов. под ред. А. Г. Лаптева. Казань: Отечество 2013; 454.

10. Mitin A. K., Nikolaikina N. E., Pushnov A. S., Zagustina N. A. Geometric characteristics of packing's and hydrodynamics of packed biotrickling filters for air-gas purification. Chemical and Petroleum Engineering 2016; V. 52 (1): 47–52.

11. Городилов А. А., Беренгартен М. Г., Пушнов А. С. Особенности пленочного течения жидкости по гофрированной поверхности регулярных насадок с перфорацией. Теоретические основы химической технологии 2016; Т. 50 (3): 334–344.

References

1. Ziganshin M. G., Kolesnik A. A., Ziganshin A. M. Designing apparatus for dust removal: a training manual. 2nd ed. – Saint Petersburg: Lan Publishing House 2014; 544.

2. Dmitriyev A. V., Makousheva O. S., Kalimullin I. R., Neekolayev A. N. Vortex devices for cleaning large-volume gas emissions of industrial enterprises. Ecology and industry of Russia 2012; (1): 4–7.

3. Voinov N. A., Zhukova O. P., Kozhukhova N. Yu., Bogatkova A. V. Vortex gas-liquid separator. Khimiya rastitel'nogo syr'ya 2018; (2); 217–223.

4. Komissarov Yu. A., Gordeev L. S., Vent D. P. Design principles and design of industrial apparatuses. Moscow: Urait Publishing House 2017; 368 p.

5. Razinov A. I., Klinov A. V., Dyakonov G. S. Processes and apparatuses of chemical technology. Kazan: Kazan National Research Technological University Press 2017; 860 p.

6. Basharov M. M., Laptev A. G. Efficiency of packed gas separators and mesh demisters at enterprises of the fuel and energy complex. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki 2016; (3): 57–60.

7. Laptev A. G., Basharov M. M., Lapteva E. A. Farakhov T. M. Models of interphase transport and calculation of process efficiency. Part 1. Hydromechanical processes. Kazan: Center for innovative technology 2017; 392.

8. Dmitriev A. V., Zinurov V. E., Dmitrieva O. S., Nguyen Vu L. Trapping of finely dispersed solid particles from gas flows in rectangular separators. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta 2018; V. 22 (3): 138–144.

9. Kagan A. M., Laptev A. G., Pushnov A. S., Farakhov M. I. Contact packings of industrial heat and mass transfer apparatuses. Kazan: Otechestvo 2013; 454.

10. Mitin A. K., Nikolaikina N. E., Pushnov A. S., Zagustina N. A. Geometric characteristics of packing's and hydrodynamics of packed biotrickling filters for air-gas purification. Chemical and Petroleum Engineering 2016; V. 52 (1): 47–52.

11. Gorodilov A. A., Berengarten M. G., Pushnov A. S. Features of fluid film falling on the corrugated surface of structured packings with perforations. Theoretical foundations of chemical engineering 2016; V.50. (3): 334–344.



<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-56-62>

УДК 629.7.017.1

Функционально-эксплуатационный риск как критерий для оценки долговечности автономной энергетической системы

Недосекин А. О.¹, Смирнов А. В., Макаренко Д. П., Абдулаева З. И.^{2*}

¹ ООО «СИ-ФИНАНС»

194017, Санкт-Петербург, Россия, пр. Энгельса 53

² ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И. И. Мечникова»

195067, г. Санкт-Петербург, Россия Пискаревский пр., д. 47

Поступила / Received 13.11.2018

Принята к печати / Accepted for publication 05.03.2019

Представлены новые модели и методы оценки остаточного ресурса автономной энергетической системы с использованием критерия функционально-эксплуатационного риска (ФЭР). Цель работы — продемонстрировать новый способ оценки долговечности, на основе аппарата нечетких множеств и мягких вычислений. Долговечность в работе понимается как комплексное свойство, напрямую примыкающее к комплексному свойству системной устойчивости, как это понимается в «западной» практике оценки и обеспечения надежности технических систем. В связи с отсутствием достоверной однородной статистики по отказам и восстановлениям оборудования системы применяются треугольно-нечеткие оценки интенсивностей отказов и восстановлений как нечетких функций времени, построенных на неполных данных и экспертных оценках. ФЭР в модели — это возможность того, что коэффициент готовности системы окажется ниже нормативного уровня. Рассмотрен пример оценки ФЭР и остаточного ресурса резервированной системы холодоснабжения специального объекта. Рассматривается переход от парадигмы структурной надежности к парадигме функциональной надежности, основанной на непрерывной деградации технологических параметров автономной энергетической системы. В данном случае ФЭР уже не может быть оценен по критерию внезапного отказа, и невозможно построить марковскую сеть на дискретных состояниях технической системы. При таких допущениях уместно прогнозировать определяющие функциональные параметры технической системы как нечеткие функции общего вида и оценивать остаточный ресурс технической системы (ТС) как нечеткую случайную величину. Тогда ФЭР оценивается как возможность того, что остаточный ресурс ТС оказывается ниже своего гарантийного срока, определенного поставщиком оборудования ТС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ответственная техническая система (ОТС), функционально-эксплуатационный риск (ФЭР), неблагоприятные воздействия (НВ), риск-функция, долговечность, ресурс, нечеткие числа, унимодальные нечеткие функции, мягкие вычисления

Адрес для переписки:

Абдулаева З. И.

ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И. И. Мечникова», кафедра медицинской информатики и физики,

Пискаревский пр., 47, 195067, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: zina@bk.ru

Address for correspondence:

Abdoulava Z. I.

North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, Department of Medical Informatics and Physics, Piskarevskiy, 47, 195067, St. Petersburg, Russia,
e-mail: zina@bk.ru

Для цитирования:

Недосекин А. О., Смирнов А. В., Макаренко Д. П., Абдулаева З. И. Функционально-эксплуатационный риск как критерий для оценки долговечности автономной энергетической системы // Надежность и безопасность энергетики. 2019. – Т. 12, №1. – С. 56–62.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-56-62>

For citation:

Nedosekin A. O., Smirnov A. V., Makarenko D. P., Abdoulava Z. I. [Functional and operational risk as a criterion for assessing the durability of autonomous energy system]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 56–62 (in Russian).

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-56-62>

Functional and operational risk as a criterion for assessing the durability of an autonomous energy system

Nedosekin A. O.¹, Smirnov A. V., Makarenko D. P., Abdoulaeva Z. I.^{2*}

¹ LLC «C-FINANCE»,

194017, St. Petersburg, Russia Engels ave. 53

² North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, Department of Medical Informatics and Physics,
195067, St. Petersburg, Russia, Piskarevskiy., 47

The article presents new models and methods for estimating the residual service life of an autonomous energy system, using the functional operational risk criterion (FOR). The purpose of the article is to demonstrate a new method of durability evaluation using the fuzzy logic and soft computing framework. Durability in the article is understood as a complex property directly adjacent to the complex property of system resilience, as understood in the Western practice of assessing and ensuring the reliability of technical systems. Due to the lack of reliable homogeneous statistics on system equipment failures and recoveries, triangular fuzzy estimates of failure and recovery intensities are used as fuzzy functions of time based on incomplete data and expert estimates. The FOR in the model is the possibility for the system availability ratio to be below the standard level. An example of the evaluation of the FOR and the residual service life of a redundant cold supply system of a special facility is considered. The transition from the paradigm of structural reliability to the paradigm of functional reliability based on the continuous degradation of the technological parameters of an autonomous energy system is considered. In this case, the FOR can no longer be evaluated by the criterion of a sudden failure, nor is it possible to build a Markov's chain on discrete states of the technical system. Assuming this, it is appropriate to predict the defining functional parameters of a technical system as fuzzy functions of a general form and to estimate the residual service life of the technical system as a fuzzy random variable. Then the FOR is estimated as the possibility for the residual life of the technical system to be below its warranty period, as determined by the supplier of the equipment.

KEYWORDS: critical technical system (CTS), functional and operational risk (FOR), adverse effects (AE), risk function, durability, service life, fuzzy numbers, unimodal fuzzy functions, soft computing

Введение

Под ответственными техническими системами (ОТС) широкого спектра, включая автономные энергетические системы, понимаются такие системы объектов и комплексов, отказ которых может привести к чрезвычайным последствиям (срыв боевого задания, авария, гибель людей, серьезный экономический ущерб). По умолчанию, такие системы должны обладать коэффициентом готовности не хуже 0.99, что накладывает определенные требования к конфигурации ОТС и базовым режимам ее функционирования.

С позиций общей теории ОТС, она должна обладать нормативно-допустимыми уровнями своих измеримых свойств (рисунок 1).

Когда ОТС функционирует в штатных условиях, ее эффективность — это ее паспортная производительность (располагаемая электрическая мощность, объем кондиционируемого воздуха, производительность по теплу/холоду и т. д.). В условиях возмущений класса U система проявляет свои специфические свойства: режимную устойчивость, надежность, живучесть, безопасность. Все названные свойства являются частными свойствами интегральной устойчивости функционирования (resilience) [1, 2].

Потеря должного уровня устойчивости сопряжена с риском того, что это переведет объект, которому придана ОТС, в негативное состояние. По специфике потенциальных негативов, можно выделить следующие классы рисков:

– риск промышленной аварии (РПА) — возможность того, что на опасном производственном объекте произойдет авария, сопряженная с гибелью/травмированием людей и повреждением имущества. Подробно анализ рисков этого класса проводится в [3];

– проектный риск (ПР) — возможность того, что основной причиной ожидаемого негатива могут выступить ошибки в конструкторской документации и/или в проектных расчетах, неверный выбор базовых принципов работы ОТС и т. д.;

– экономический риск (ЭР) — возможность того, что неправильное функционирование ОТС может нанести объекту ущерб определенного уровня;

– функционально-эксплуатационный риск (ФЭР) — оцениваемая в настоящем возможность того, что в конкретный момент времени T в будущем техническая готовность ОТС, измеряемая по функциональным критериям, окажется ниже нормативно допустимого предела.

У настоящей статьи есть две основные цели:

а) предложить модельный каркас для оценки и прогнозирования уровня ФЭР (здесь и далее этот уровень обозначается как *Risk*);

б) применить разработанную модель для целей определения уровня долговечности ОТС.

Модель оценки ФЭР ОТС

Рассмотрим процесс анализа технической готовности ОТС (рисунок 2).

На рисунке 2 отображена ситуация, когда интенсив-

му управления ОТС на фиксацию предотказовых функциональных состояний, применяя технику определяющих параметров. В этом случае у системы появляется некоторый резерв времени на предотвращение своего полного отказа за счет принятия предупредительных мер (замена формально неотказавшего оборудования, упреждающее пополнение ЗИП и ПКИ, формирование резервного фонда на финансирование процедур восстановления внезапных отказов).

Важно совершенствовать процедуры продления гарантийного срока эксплуатации оборудования, вводя в эти процедуры критерий функционально-эксплуатационного риска. Ресурс оборудования может быть продлен по факту незначительности накопленного износа; однако он не может быть продлен, если техника эксплуатируется без соблюдения соответствующих требований.

Литература

1. Черкесов Г. Н., Недосекин А. О. Оценка живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности (часть 1) // Надежность 2016; (2): 3–15.
2. Christopher W. Zobel and Lara Khansa Quantifying Cyberinfrastructure Resilience against Multi-Event, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061-0235.
3. Недосекин А. О., Абдулаева З. И. Оценка промышленных и экономических рисков предприятия. СПб: Изд-во Политехнического университета 2016;: 107.
4. Смирнов А. В., Недосекин А. О., Макаренко Д. П., Александров С. В. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования технических систем специальных объектов МО РФ // В сб. докладов: Актуальные вопросы развития систем автономного электроснабжения объектов Министерства обороны Российской Федерации. СПб: Изд-во Политехнического университета 2017;: 116–122.
5. Недосекин А. О., Макаренко Д. П. Абдулаева З. И. Нечетко-вероятностная модель для оценки рисков ответственных технических систем // Информатика и космос 2018; (1): 92–99.
6. Недосекин А. О., Макаренко Д. П., Абдулаева З. И., Козловский А. Н. Основные пути моделирования неопределенности в сложных системах // Информатизация и связь 2017; (4): 157–160.

7. Абдулаева З. И., Недосекин А. О. Стратегический анализ инновационных рисков. СПб: Изд. СПбГПУ 2013;: 145.

8. Zobel C. W., Khansa L. Quantifying Cyberinfrastructure Resilience against Multi-Event Attacks// Decision Sciences, Volume 43 Number 4, August 2012;: 687–710.

9. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб: Питер 2005;: 478.

References

1. Cherkesov G. N., Nedosekin A. O. Evaluation of the survivability of complex structures with reusable impacts of high accuracy (part 1). Nadejnost = Dependability 2016; (2): 3–15. (In Russ.)
2. Christopher W. Zobel and Lara Khansa Quantifying Cyberinfrastructure Resilience against Multi-Event, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061-0235.
3. Nedosekin A. O., Abdoulaeva Z. I. Assessment of industrial and economic risks of the enterprise. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House 2016;: 107 (In Russ.)
4. Smirnov A. V., Nedosekin A. O., Makarenko D. P., Aleksandrov S. V. Prediction of residual life of equipment of technical systems of special objects of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Reports: Actual issues of the development of systems of autonomous power supply facilities of the Ministry of Defense of the Russian Federation. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House 2017;: 116–122. (In Russ.)
5. Nedosekin A. O., Makarenko D. P. Abdoulaeva Z. I. Fuzzy-probabilistic model for risk assessment of responsible technical systems. Informatsia i kosmos = Information and space 2018; (1): 92–99. (In Russ.)
6. Nedosekin A. O., Makarenko D. P., Abdoulaeva Z. I., Kozlovsky A. N. The main ways of modeling uncertainty in complex systems. Informatizatsia i svjaz = Informatization and Communication 2017; (4): 157–160. (In Russ.)
7. Abdoulaeva Z. I., Nedosekin A. O. Strategic analysis of innovation risks. St. Petersburg: Ed. SPbGPU 2013;: 145 (In Russ.)
8. Zobel C. W., Khansa L. Quantifying Cyberinfrastructure Resilience against Multi-Event Attacks. Decision Sciences, Volume 43 Number 4, August 2012;: 687–710.
9. Cherkesov G. N. Reliability of hardware and software systems. St. Petersburg: Peter 2005;: 478. (In Russ.)



ДИСКУССИИ

Об одной ошибке в «Методике осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя»

Музыка Р. Р.

Студентка Омского государственного технического университета,
г. Омск, ул. 7-я Любинская, д. 20, E-mail: post@rpersonal.ru

Предисловие. Один из областных арбитражных судов рассматривает несколько исков генерирующей компании к сетевой компании о неполной оплате потребленной тепловой энергии и теплоносителя. Основой для спора является то, что подпитка системы теплоснабжения осуществляется в общий коллектор, при этом отсутствует приборный учет потоков подпитки для собственных нужд нескольких источников теплоты и потоков подпитки нескольких магистралей тепловой сети. Стороны предлагают различные методики расчета потоков подпиточной воды, суд с помощью независимой экспертизы пытается установить соответствие этих предлагаемых методик действующим нормативным документам по учету тепловой энергии и теплоносителя.

Суть ошибки. Согласно п. 7 статьи 19 Федерального закона № 190-ФЗ от 27.07.2010 г. «О теплоснабжении» коммерческий учет тепловой энергии и теплоносителя осуществляется в соответствии с правилами, которые утверждаются Правительством РФ. Они должны содержать, кроме прочего, порядок определения количества поставленных тепловой энергии и теплоносителя в целях их коммерческого учета, в том числе расчетным путем, а также порядок распределения потерь тепловой энергии и теплоносителя между тепловыми сетями теплоснабжающих организаций и теплосетевых организаций при отсутствии приборов учета на границах смежных тепловых сетей. Правительство РФ постановлением от 18.11.2013 г. № 1034 (п. 1) утвердило «Правила коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя» и поручило (п. 3) Министерству строительства и ЖКХ РФ разработать соответствующую методику учета. Приказом Минстроя РФ от 17.03.2014 г. № 99/пр была утверждена «Методика осуществления коммерческого учета, теплоносителя» [1].

Согласно п. 16 [1], если на источнике тепловой энергии подпитка осуществляется в общий коллектор обратной сетевой воды, в том числе на компенсацию внутристанционных расходов на собственные нужды источника тепловой энергии, то для определения массы теплоносителя, израсходованного на подпитку выводов тепловой сети, из общей массы подпитки вычитается масса теплоносителя, израсходованного на собственные нужды источника тепловой энергии.

Масса подпитки каждой магистрали для закрытых и открытых систем теплоснабжения определяется расчетным путем пропорционально массе отпущенного теплоносителя, с использованием формул $3.4 \div 3.6$ [1].

В этих формулах используется показатель — масса теплоносителя, израсходованного на подпитку собственных нужд теплоисточника, которая в свою очередь определяется по следующей формуле

$$M_{\text{сн}} = \frac{0,25}{100 \times V_{\text{ти}} \times \rho}, \text{ т (формула 3.7 в [1])},$$

где $V_{\text{ти}}$ — объем теплофикационной системы теплоисточника согласно паспортным данным, м^3 ; ρ — плотность подпиточной воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Из формулы 3.7 в [1] следует, что в ней имеется техническая ошибка. Проверка формулы с помощью правил размерностей показывает

$$M_{\text{сн}} \rightarrow \frac{\%}{\% \times \text{м}^3 \times \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{\% \times \text{м}^3}{\% \times \text{м}^3 \times \text{кг}} = \frac{1}{\text{кг (т)}},$$

т. е. размерность $1/\text{кг(т)}$ не соответствует физической сути величины подпитки (утечки) тепловой сети.

Согласно действующим нормативным документам между величиной подпитки (утечки) и величиной внутреннего объема тепловой сети существует прямо пропорциональная зависимость, т. е. чем больше внутренний объем тепловой сети, тем больше величина подпитки (утечки) этой сети, но не обратно пропорциональная зависимость, следующая из формулы 3.7 [1]. При этом необходимо учитывать следующие нормативные документы:

- п. 6.16 СП 124.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003. «Тепловые сети»;

- п. 4.1.8 «Методика определения потребности в топливе, электрической энергии и воде при производстве и передаче тепловой энергии и теплоносителей в сетях коммунального теплоснабжения. МДК 4-05.2004», утверждена зам. председателя Госстроя России 12.08.2003 г.;

- п. 1.2.8 «Методика определения нормативных значений показателей функционирования водяных тепловых сетей систем коммунального теплоснабжения», утверждена приказом Госстроя России от 01.10.2001 г. №225;

- п. 10.1.23 «Порядок определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя», утвержден приказом Минэнерго РФ от 30.12.2008 г. №325.

Из упомянутых документов следует, что формула 3.7 в [1] должна выглядеть следующим образом

ИНФОРМАЦИЯ

Пост-релиз совместного научного семинара «НИУ МЭИ» и Научного отделения проблем инфраструктурного развития (НОПИР) Академии военных наук (АВН) на тему:

«Проблемы и пути обеспечения безопасности энергетики и других инфраструктурных систем экономики России»

Открыл научный семинар директор программы развития НИУ «МЭИ», к. т. н., проф. АВН С. В. Белоусов. Он приветствовал участников семинара от имени ректора и университета, отметил ключевую роль энергетики в жизни страны, важность обеспечения безопасности энергетического комплекса и других инфраструктурных систем государства и тот вклад, который члены отделения могут внести в решение соответствующих задач.

С вступительным словом выступил руководитель НОПИР, действительный член (академик) АВН, Заслуженный энергетик РФ Н. Н. Швец, в котором он рассказал об истории создания НОПИР АВН, достигнутых результатах и многолетнем опыте сотрудничества с НИУ «МЭИ».

Затем в торжественной обстановке были вручены дипломы новым профессорам, член-корреспондентам и академикам НОПИР АВН.

Дискуссионную часть научного семинара открыл заместитель руководителя НОПИР, член-корреспондент АВН, член Комиссии по вопросам патриотического и духовно-нравственного воспитания молодежи Совета при Президенте РФ по межнациональным отношениям, доцент МГИМО МИД России А. Е. Ужанов с докладом на тему: «Интеграция исследовательского и организационно-практического опыта НОПИР АВН в

разработку и реализацию Концепции технологического патриотизма в Российской Федерации».

В докладе проф. АВН, доц. кафедры Техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ» Р. К. Борисова на тему: «Электромагнитная совместимость — важнейший фактор обеспечения безопасности энергетики и других инфраструктурных систем экономики России», — были затронуты вопросы актуальности обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) при переходе на современные цифровые системы управления, контроля и сигнализации в электроэнергетике и других отраслях экономики РФ.

Продолжил тему ЭМС доклад проф. АВН, зав. кафедрой Техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) НИУ «МЭИ» к. т. н., доц. С. И. Хренова: «Проведение испытаний на молниестойкость элементов конструкции российских самолётов». Отметив наличие уникального оборудования на кафедре ТЭВН, позволяющего проводить такого рода работы, он рассказал о ближайших планах по проведению испытаний элементов разрабатываемых в настоящее время в России самолётов и вертолётных и призвал обратиться к руководству АВН с предложением о разработке стандарта по обязательному испытанию объектов ОПК на молниестойкость.

Дополнил тему ЭМС доклад начальника группы уль-



Фото предоставлено пресс-службой НИУ «МЭИ». На фото: участники семинара



11 марта 2019 г. исполняется 85 лет
д. э. н. профессору, академику РАЕН
Непомнящему Владимиру Абрамовичу.

Непомнящий В. А. родился в г. Одессе. С началом Великой отечественной войны эвакуировался последовательно в Сталиград, Кзыл-Орду, Чименг, а после окончания войны семья переехала в г. Янги-Юль (Узбекистан).

В 1957 г. окончил энергетический факультет Среднеазиатского политехнического института (г. Ташкент) по специальности «Центральные электрические станции, сети и системы».

В 1968 г. защитил кандидатскую (к. т. н.), а в 1988 г. докторскую диссертацию (д. э. н.) на тему надежности электроэнергетических систем и сетей и методы ее учета при проектировании развития энергосистем и их объединений.

С 1959 по 1982 гг. работал в Теплоэлектропроекте, затем в Энергосетьпроекте (Среднеазиатское отделение) в должностях от ст. инженера до начальника отдела. Как главный инженер проекта Объединенных энергосистем Средней Азии и Казахстана выполнял ряд работ по объединению отдельных энергосистем и технико-экономическому обоснованию ряда крупнейших электростанций и схем выдачи их мощности: Нурекской и Рогунской ГЭС в Таджикистане, Токтогульской ГЭС в Киргизии, Ташкентской и Сырдарьинской ГРЭС и Чарвакской ГЭС в Узбекистане.

В 1962–1963 гг. В. А. Непомнящим был разработан первый в Средней Азии и Южном Казахстане консолидированный топливно-энергетический баланс на 20-летнюю перспективу, при формировании которого были применены основные методы разработки энергетических балансов энергосистем и их объединений.

При проектировании развития Карагандинской энергосистемы в Казахстане впервые в практике проектирования было проведено уникальное исследование эффективности применения неполнофазных режимов ЛЭП 220 кВ «Караганда–Джезказган» и «Караганда–Балхаш» для повышения надежности электроснабжения этих энергоузлов.

В 1979 г. ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект» были утверждены разработанные В. А. Непомнящим «Методические рекомендации по расчету надежности электрических сетей», на основании которых были проведены расчеты надежности схемы электроснабжения БАМ.

В 1993 г. В. А. Непомнящим в составе научного коллектива СОПС АН Узбекистана впервые в научной практике республики была сформулирована с применением разработанной им оригинальной экономико-математической модели «Экономическая стратегия Республики Узбекистана в переходный период к рыночным отношениям (1993–2000 гг.)»

Из уникальных исследований последних 10–15-ти лет можно указать на работы «Современные тарифы на электроэнергию и возможные пути их снижения» (2011 г.), «Оптимизация распределения надежности по иерархическим уровням системы электроснабжения» (генерация, магистральные и распределительные сети) (2011 г.), «Альтернативные пути развития электроэнергетики России в условиях постфинансового кризиса» (2010, 2013 гг.), «Надежность оборудования энергосистем» (2013 г.), «Надежность оборудования электрических сетей 220–750 кВ энергосистем» (2017 г.), «Экономические потери от нарушений электроснабжения» (2010 г.).

В настоящее время, несмотря на почтенный возраст, В. А. Непомнящий продолжает активно трудиться над проблемами надежности в электроэнергетике, в экономике энергетики и их математическом моделировании.

Редакционная коллегия научно-технического журнала «Надежность и безопасность энергетики» поздравляет профессора, доктора экономических наук, кандидата технических наук Владимира Абрамовича Непомнящего с 85-летием и желает ему крепкого здоровья, успехов в работе и еще долгих лет жизни.

Журналу "Надежность и безопасность энергетики" 10 лет!



Н. Д. Рогалев

От имени коллектива Национального исследовательского университета «МЭИ» примите наши самые дружеские и искренние поздравления по случаю 10-летия журнала «Надежность и безопасность энергетики».

Редколлегия журнала «Надежность и безопасность энергетики» по-прежнему верна выбранному курсу, поддерживает неизменно высокие требования к авторам и качеству статей, остаётся открытой самым современным направлениям развития энергетики. Журнал постоянно и целенаправленно освещает последние достижения науки и техники, производственные успехи в деятельности компаний и предприятий энергетики, их передовой опыт работы.

Вашему замечательному журналу удастся на протяжении 10 лет оставаться востребованным и престижным. Редколлегия, редакция и авторы стремятся помогать реформированию энергетики, остро ставят вопросы взаимодействия головных энергетических организаций и региональных энергосистем в повышении надёжности работы Единой энергетической системы, поднимают проблемы энерго- и ресурсосбережения в отрасли, освещают практику инновационного развития предприятий, способствуют улучшению условий труда и быта энергетиков.

Журнал «Надежность и безопасность энергетики» всегда отличали высокий научный уровень и направленность на решение злободневных задач. Живая полемика, новизна идей, «созвездие» ярких авторов многие годы обеспечивали популярность издания, позволили не только сохранить, но и преумножить количество своих читателей.

Желаем Вам дальнейших творческих успехов на благо российской энергетики, здоровья, счастья, интересных публикаций, заинтересованной и благодарной аудитории, экономической стабильности и уверенности в завтрашнем дне!

Ректор НИУ «МЭИ»

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Н. Д. Рогалев'.

Н. Д. Рогалев

Журналу "Надежность и безопасность энергетики" 10 лет!



С. Н. Моденов

Примите поздравления с 10-летием научно-технического журнала «Надежность и безопасность энергетики». За эти годы журнал по праву занял свое место в ряду наиболее серьезных и солидных изданий энергетического профиля. На его страницах обсуждаются самые актуальные научно-технические проблемы современной энергетики, среди авторов — наиболее авторитетные специалисты в области энергетики, высококвалифицированные сотрудники производственных предприятий, представители научных организаций. Но главное — журнал нашел своего читателя. Публикации издания вызывают интерес широкого круга специалистов, его экземпляры можно увидеть на рабочих столах сотрудников большинства предприятий энергетики.

Пусть этот первый юбилей станет отсчетом новой страницы в истории журнала, наполненной интересными темами и новыми проектами. Ассоциация предприятий энергетики Омской области желает коллективу, своим трудом создающему каждый номер журнала, творческого поиска, острого пера, реализации планов и благополучия!

Правление НО «Ассоциация предприятий
энергетики Омской области»
Председатель Правления

С. Н. Моденов

120 лет ЭС-1 Центральной ТЭЦ

Северная столица, знаменитый город на Неве, прекрасный, неповторимый, известный во всем мире своими шедеврами архитектуры и искусства, сосредоточенными по большей части в его сердце. Это сердце работает и восхищает миллионы людей благодаря энергии, поступающей с электростанции №1 Центральной ТЭЦ. Героиня, на которую возложена почетная миссия, отмечает грандиозный юбилей — 120 лет создания. И это, без преувеличения, событие государственной важности.

ЭС-1 заработала 16 ноября 1898 г. и стала мощнейшей из тогда существующих электростанций.

До 1917 г. она являлась электростанцией «Общества Электрического освещения 1886 г.». На ней были установлены четыре паровых котла и шесть паровых машин «Сименс и Гальске» суммарной мощностью 4200 кВт. Электростанция стала одной из трех крупнейших в Петербурге наряду с построенными примерно в то же время станциями общества «Гелиос» и «Бельгийского анонимного общества электрического освещения».

Открытие столь мощного энергообъекта дало обществу возможность закрыть семь своих небольших городских станций, подключив к нему новых абонентов, включая торговые помещения Гостиного двора. В начале следующего столетия электростанцию расширили, а к 1916 г. в машинном зале уже было девять турбин и восемь паровых машин общей установленной мощностью около 49000 кВт, что наполовину покрывало потребности города в электроэнергии. В декабре 1917 г. станция была национализирована, став первой государственной ЭС. В 1920-е годы на ней была установлена самая крупная по тем временам турбина 30 МВт, а к 1927 г. ее мощность достигла 68 МВт.

В годы блокады Ленинграда станция продолжала ра-

ботать, обеспечивая город теплом и электроэнергией. На ее территории рвались снаряды, фронт проходил всего в 12 километрах. К концу января 1942 г. в Ленинграде остановились все остальные электростанции, и только ЭС-1 все еще вырабатывала энергию, что впоследствии позволило запустить турбины остальных ТЭЦ.

За годы существования ЭС-1 на ней было внедрено немало новых решений. Например, в 1940-м несколько котлов были переведены на искусственный газ. В 1960-х годах впервые в стране была введена в работу опытно-промышленная парогазовая установка, проработавшая около десяти лет. Это был опытный образец, и его пришлось демонтировать. Кроме того, именно ЭС-1 начала вместе с Электростанцией №3 поставлять энергию параллельно в общую теплосеть. Это был первый опыт совместной работы генерирующих мощностей, и в дальнейшем он широко использовался другими электростанциями страны. В 1970-х годах на ЭС-1 началась модернизация, поэтапно были демонтированы турбины, и к 90-м годам в эксплуатации остались паровые и водогрейные котлы общей мощностью 480 Гкал/ч.

Ну, а в 1999 г. произошло объединение трех станций в Центральную ТЭЦ.

Недавно в жизни ЭС-1 произошло еще одно знаковое событие. 5 декабря 2016 г. после масштабной реконструкции в работу были введены и стали выдавать мощность два энергоблока с газовыми турбинами электрической мощностью по 50 МВт каждый и общей тепловой мощностью около 120 Гкал/ч.

Каждый энергоблок включает газотурбинную установку с генератором и вертикальный водогрейный котел-утилизатор для нагрева воды замкнутого контура. Также было построено новое ЗРУ-110 кВ с переводом в него существующих кабельных линий с учетом



На фото станция ЭС-1 (Энергия Северо-Запада, №12 (179), ноябрь 2018 г.)

ХРОНИКА, ПУБЛИКАЦИИ



Как ограничить глобальное потепление.

Генеральный секретарь ООН АНТОНИУ ГУТЕРРИШ

Совсем недавно мы были свидетелями того, как десятки тысяч молодых людей вышли на улицы с четким посланием к мировым лидерам: пора предпринимать срочные действия для спасения нашей планеты и нашего будущего от климатической катастрофы.

Эти школьники поняли то, что, по-видимому, никак не могут осознать многие из старших: мы вступили в гонку, приз в которой — наши жизни, и в этой гонке мы проигрываем. Окно возможностей закрывается; время — это роскошь, которую мы больше не можем себе позволить, и откладывать борьбу с изменением климата почти так же опасно, как отрицать существование этой проблемы.

Мое поколение не смогло должным образом отреагировать на колоссальный вызов изменения климата. Молодежь это остро ощущает, поэтому ее злость неудивительна.

Несмотря на все разговоры, которые продолжаются уже много лет, показатели выбросов вредных веществ во всем мире достигают рекордных уровней, и нет никаких признаков того, что это предел. Концентрация углекислого газа в нашей атмосфере является самой высокой за последние 3 млн лет. Последние четыре года были самыми жаркими за всю историю, а в Арктике температура воздуха зимой с 1990 г. повысилась на 3°C. Уровень моря повышается, коралловые рифы гибнут, и мы уже начинаем отмечать опасное для жизни воздействие изменения климата на здоровье людей в результате загрязнения воздуха, периодов сильной жары и рисков для продовольственной безопасности.

К счастью, у нас есть Парижское соглашение — дальновидная, жизнеспособная, перспективная политическая программа, в которой точно определено, что необходимо делать для того, чтобы остановить дестабилизацию климата и обратить вспять ее последствия. Но без амбициозных действий соглашение само по себе бессмысленно.

Именно поэтому я собираю в этом году мировых лидеров на саммит по борьбе с изменением климата. Я призываю всех лидеров приехать в сентябре в Нью-Йорк с конкретными, реалистичными планами по увеличению к 2020 г. их определяемых на национальном уровне вкладов в соответствии с целью сокращения выбросов парниковых газов на 45% в течение следующего десятилетия и сведения их к нулю к 2050 г.

На саммит соберутся представители правительств, частного сектора, гражданского общества, местных властей и международных организаций для выработки амбициозных решений в шести областях: возобновляемые источники энергии, сокращение выбросов, устойчивая инфраструктура, рациональное ведение сельского хозяйства и рациональное использование лесов и океанов, противостояние последствиям изменения климата, инвестиции в зеленую экономику.

Последние аналитические данные говорят о том, что, если мы начнем действовать уже сейчас, мы сможем сократить выбросы углерода в течение 12 лет и ограничить глобальное потепление 1,5°C. Но если мы будем продолжать поступать так, как мы поступаем сейчас, это будет иметь непредсказуемые последствия.

Борьба с изменением климата необходима для устранения угрозы самому нашему существованию, однако эта борьба сопряжена с издержками. И поэтому планы действий не должны приводить к появлению победителей и проигравших или усугублять экономическое неравенство; они должны быть справедливыми и создавать новые возможности для тех, кто будет испытывать их негативное воздействие, реализуясь в русле справедливых преобразований.

Бизнес на нашей стороне. Ускоренное решение проблемы изменения климата может укрепить нашу экономику и обеспечить создание рабочих мест и при этом сделать воздух более чистым, сохранить природную среду обитания и биоразнообразие и защитить окружающую среду.

Новые технологии и инженерные решения уже позволяют получать энергию по более низким ценам по сравнению с источниками энергии, основанными на использовании ископаемого топлива. Солнечная энергия и энергия ветра в настоящее время являются самыми дешевыми источниками энергии в энергосистемах практически всех ведущих в экономическом отношении стран. Но мы должны приступить к радикальным изменениям.

Это значит, что необходимо прекратить субсидировать добычу ископаемых видов топлива и ведение высокоэмиссионного сельского хозяйства и перейти к использованию возобновляемых источников энергии, электромобилей и рациональным с климатической точки зрения методам хозяйствования. Это значит, что необходимо установить на углеводороды такие цены, которые отражают истинную стоимость выбросов: начиная с рисков, связанных с изменением климата, и заканчивая угрожающим здоровью загрязнением воздуха. И это значит, что необходимо закрыть угольные шахты и электростанции и предложить работающим на них людям более здоровые альтернативы, чтобы преобразования были справедливыми, всеохватными и прибыльными.

Движение набирает обороты; люди прислушиваются к тому, что происходит, и уже появилась новая решимость претворить в жизнь обещание, данное в Парижском соглашении. Саммит по климату должен стать отправной точкой для строительства такого будущего, которое нам нужно.

Правила для авторов

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное слепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования — актуальность тематики, информативность, научная новизна.

3. Статья представляется в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. Объем статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

4. На первой странице статьи указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках.

Статья включает: аннотацию (в пределах 200–250 слов); ключевые слова (5–6 слов); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их

новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках. Подробные правила подготовки статей доступны на веб-сайте www.sigma08.ru.

5. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

6. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

7. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

8. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

9. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

Author Guidelines

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

3. All materials should be submitted in electronic file in the Word for Windows. The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

4. The article should contain UDC number, Title, Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (5–6 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References. Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English

and Russian languages. Detailed rules for the preparation of articles are available on the website www.sigma08.ru.

5. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, e-mail.

6. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

7. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

8. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

9. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper. Articles not meeting the requirements would not be accepted.



ТРЕНАЖЕР ГЛАВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СТАНЦИИ

Фирма АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (АО «ТЭСТ») разработала компьютерный тренажерный комплекс главной электрической схемы станции с ОРУ-220 кВ, ОРУ-110 кВ, КРУ-6 кВ.

Тренажер главной электрической схемы станции прошел приемо-сдаточные испытания.

Тренажер главной электрической схемы станции прошел государственную регистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Тренажер главной электрической схемы станции может применяться для обучения оперативного персонала электростанции выработке и распределению электрической энергии на электростанциях, в учебных центрах, высших и средних учебных заведениях.

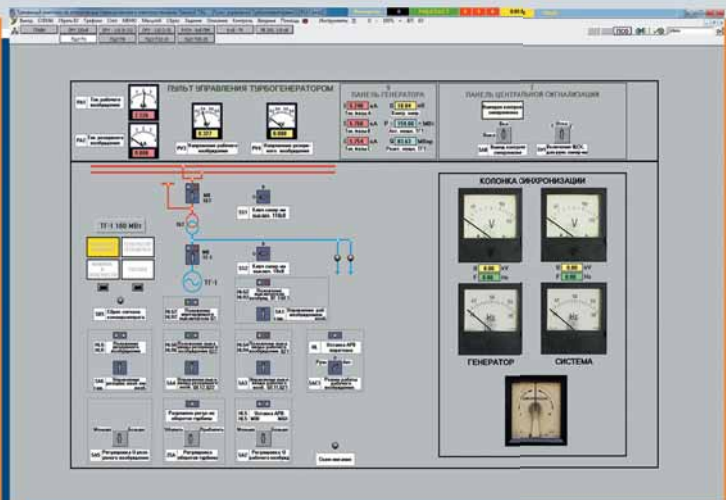
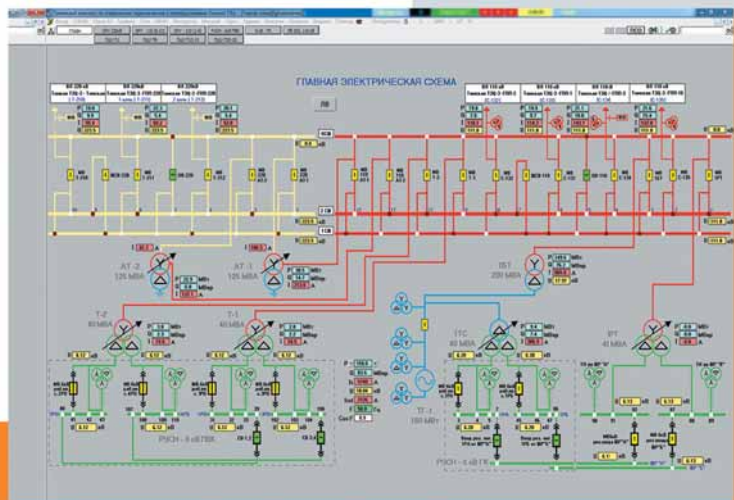


Состав главной электрической схемы станции:

- ОРУ-220 кВ
- ОРУ-110 кВ
- КРУ-6 кВ
- 2 автотрансформатора AT1, AT2
- генератор ТВВ-160-2ЕУ3
- блочный трансформатор 110/18 кВ
- трансформатор собственных нужд 18/6 кВ
- 2 трансформатора 110/6 кВ
- 1 резервный трансформатор 110/6 кВ

Состав тренажера главной электрической схемы станции:

- активные динамические мнемосхемы 12 шт.
- всережимная физическая модель
- модель РЗА (релейных защит и автоматики), блокировок, сигнализаций, АВР
- комплект технических средств (плакаты, УВН)
- развитая конфигурация сети
- пульт инструктора
- комплект аварийных ситуаций
- контролирующая программа
- комплект автоматизированных сценариев тренировок с оценкой
- графопостроение
- сохранение режимов
- система поддержки оператора
- протоколы действий оператора, ошибок, сигнализации, защит, блокировок



АО «Тренажеры электрических станций и сетей»:

117587, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 125 Ж, корп. 6
Тел. (495) 665-76-00, факс (495) 382-79-74
e-mail: magid@testenergo.ru, www.testenergo.ru

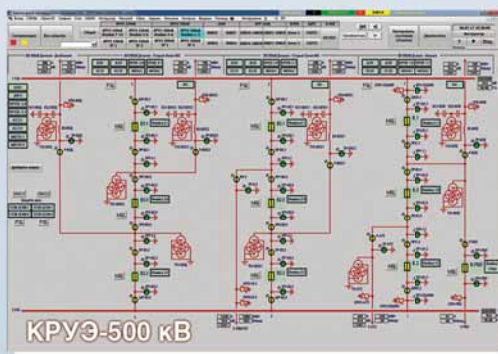


ТЭСТ

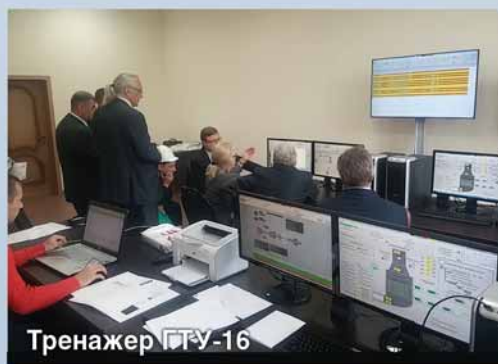
Тренажеры электрических станций и сетей



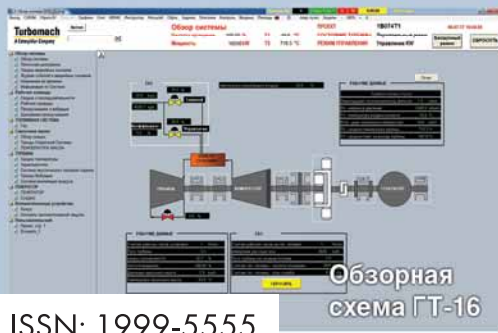
Тренажер Главной
электрической схемы станции



КРУЭ-500 кВ



Тренажер ГТУ-16



Обзорная
схема ГТ-16

Гарантии надежности персонала

- всережимность IT-тренажеров, полная адекватность модели объекта и рабочего места оператора энергообъекту-прототипу
- новейшие компьютерные методы обучения штатному и противоаварийному управлению
- информационное и дидактическое качество обучающих программ
- создание единого тренажерного комплекса для подготовки всего персонала энергопредприятия

Современные информационные технологии

- реализация любых энергообъектов и систем управления
- реализация современных дидактических Web-приложений
- значительное снижение стоимости при росте качества и функциональности
- гибкая интеграция в компьютерную сеть предприятия

Российский и международный опыт

- 40 лет на российском и зарубежных рынках, аккредитация при Правительстве РФ и ЮНЕСКО
- российская нормативная сертификация
- международная сертификация качества
- апробация на российских и международных выставках
- официальная эффективность внедрения на объектах электроэнергетики
- патентная защищенность программного продукта

Россия, 117587, г. Москва,
Варшавское шоссе, 125Ж
Тел. (495) 665-7600, (495) 382-7974
<http://www.testenergo.ru>,
e-mail:magid@testenergo.ru

ISSN: 1999-5555



9 771999 555772

**Новые
модели
тренажеров!**