



Том 11 №1 2018

НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИКИ

Safety & Reliability of Power Industry

В номере:

- Нормирование балансовой надежности энергосистем
- Оценка потенциальной опасности предприятий ТЭК
- Исследование надежности ОЭС Юга России
- Инженерный метод расчета параметров начальной конденсации водяного пара
- Метод ударных импульсов при вибрационной диагностике
- Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС

www.sigma08.ru
www.testenergo.ru



Организатор: НОЦ «Экология энергетики» НИУ «МЭИ»



VI Международная конференция «Золошлаки ТЭС – удаление, транспорт, переработка, складирование»

Конференция состоится 19 – 20 апреля 2018 г. в Москве на базе НИУ «МЭИ».

Официальные языки конференции: русский и английский • К открытию конференции будет издан специальный выпуск журнала, входящего в перечень ВАК • Материалы конференции также будут размещены в РИНЦ • Во время проведения мероприятия будет обеспечен синхронный перевод презентаций докладов и дискуссий.

**19–20 апреля
2018 года,
г. Москва**

Тематика проведения конференции:

- влияние тенденций изменения природоохранного законодательства на проблему обращения с золошлаками энергетики;
- влияние Справочников по внедрению НДТ в энергетику России и стран мирового сообщества на решение проблемы обращения с золошлаками;
- практика и проблемы внедрения НДТ мирового уровня в системы обращения с золошлаками;
- объемы образования и направления полезного применения золошлаков энергетики;
- потребительские свойства и сертификация золошлаков;
- влияние технологий подготовки и сжигания твердых органических топлив на потребительские свойства золошлаков и эколого-экономические показатели работы ТЭС в целом;
- влияние технологий очистки уходящих газов от оксидов азота и серы на потребительские свойства золошлаков;
- влияние технологий золоулавливания и удаления золы от золоуловителей на потребительские свойства золошлаков;
- использование золошлаков в строительной отрасли;
- использование золошлаков в сельском хозяйстве;
- применение золошлаков энергетики на предприятиях других отраслей;
- малотоннажные высокотехнологичные производства по переработке золошлаков;
- перспективные системы обращения с золошлаками энергетики на электростанциях;
- повышение квалификации и переподготовка специалистов в области обращения с золошлаками энергетики.

Приглашаем Вас и сотрудников Вашей организации принять участие в работе конференции!

Целевая аудитория: представители федеральных и региональных органов исполнительной и законодательной власти, энергетических компаний, угольных электростанций, предприятий по системам обращения с золошлаками и их переработке, профильных ВУЗов, научно-исследовательских институтов и специализированных организаций.

Планируемое количество участников: 100 человек.

Адрес Оргкомитета: Москва, ул. Красноказарменная, д.14, корпус Ж, ауд. Ж-105, Ж-107.

По вопросу участия в мероприятии обращаться по телефону: +7 495-362-7912.

Электронная почта: MalikovaEA@ecopower.ru, ZhivohinaAA@ecopower.ru

Страница конференции - <http://www.ecopower.ru/index.php?newsid=137>

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)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

В. И. БЕЛЯЕВ — к. т. н., заместитель генерального директора АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. Н. ВИВЧАР — к. г. н., заместитель директора — директор Департамента по внешним связям и стратегическому развитию Ассоциации «Совет производителей энергии» (Москва, Россия)

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)

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

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

И. Ш. ЗАГРЕТДИНОВ — к. т. н., главный инженер АО «Теплоэнергетическая компания Мосэнерго» (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. Г. 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., доцент, Генеральный директор АНО «Центр переподготовки и повышения квалификации кадров» (Краснодар, 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)

Е. М. МАРЧЕНКО — к. т. н., профессор, 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 ФГАОУ 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)

В. М. НЕУЙМИН — к. т. н., главный специалист по энергетике ООО «Технологические системы защитных покрытий» (Москва, 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)

В. СТРИЕЛКОВСКИ — доктор философии, профессор, научный сотрудник Кембриджской бизнес-школы Кембриджского университета (Англия)

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

А. Е. УЖАНОВ — к. с. н., доцент, директор Департамента по связям с общественностью Топливной компании Росатома «ТВЭЛ» (Москва, Россия)

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

Л. А. ХОМЕНКО — д. т. н., профессор, заведующий аналитическим отделом Научно-производственного объединения по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (ЦКТИ) (Санкт-Петербург, Россия)

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)

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)

В. И. ШАРАПОВ — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (Ульяновск, 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: — Маланин Д. Б.

Технический редактор — Чижов В. В.

Подписано в печать 27.03.2018 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)

EXECUTIVE EDITOR

Valeriy I. BELYAEV — Cand. of Tech. Sc., Deputy Director General, JSC «Simulators of power plants and networks» (Moscow, Russia)

EDITORIAL BOARD

Anton N. VIVCHAR — Cand. of Geogr. Sc., Deputy Director/ Director of the Department of External Relations and Strategic Development of the Association «Council of Power Producers and Power Industry Strategic Investor» (Moscow, Russia)

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)

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), Chief Engineer of JSC «Heat Power Company Mosenergo» (Moscow, Russia)

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

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

Marat H. G. IBRAGIMOV — Dr. of Tech. Sc., Professor, First Deputy Chairman, NP «Tekhnoekspo» (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 His. Sc., Director General, «Center for Retraining and Advanced Training» (Krasnodar, 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)

Evgeniy M. MARCHENKO — Cand. of Tech. Sc., Professor, 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)

Valeriy M. NEUMIN — Cand. of Tech. Sc., Chief Power Engineer, «Technological systems for protective coatings», LLC (Moscow, 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)

Wadim STRIELKOWSKI — Ph.D., University of Cambridge, Judge Business School (Cambridge, England)

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., Director of the PR Department, «TVEL, the fuel company of Rosatom» (Moscow, Russia)

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

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)

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)

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)

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)

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 ПИ № ФС77-31974 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: Chizhov V. V. Signed in the press on March 22, 2018. Printed in LLC Paritet.

Mailing address of the editorial office: NPO «Energobezопасnost» Build. 6, 125 «Zh» Varshavskoye Shosse, Moscow, 117587.
Tel: +7 495 665-76-00, tel./fax: +7 495 382-79-74; e-mail: sigma08@sigma08.ru; www.sigma08.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

Лебедева Л. М., Ковалёв Г. Ф., Крупенёв Д. С. Нормирование балансовой надежности электроэнергетических систем и формирование резерва генераторной мощности.....	4
Филиппова А. Г., Нуриева А. З., Наумкин Е. А., Кузеев И. Р. Оценка потенциальной опасности объектов предприятий топливно-энергетического комплекса	14
Непомнящий В. А. Исследование надежности ОЭС Юга в связи с присоединением новых сосредоточенных нагрузок (часть 1)	21

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

Качуринер Ю. Я., Кругликов П. А., Григорьев К. А. Инженерный метод расчета параметров начальной конденсации в высокоскоростных потоках водяного пара.....	30
Гаврилов С. Н., Гаев А. В., Никитин В. И., Пигрова Г. Д. Особенности использования метода ударных импульсов при вибрационной диагностике статоров турбогенераторов	36
Высогорец С. П. Разработка методики экспресс-анализа параметра качества изоляционного масла	41
Лаптева Е. А., Шагиева Г. К., Лаптев А. Г. Очистка воды от растворенных газов в пленочном аппарате с дискретно-шероховатыми стенками	48
Федорова Н. В., Ефимов Н. Н., Федоров Ю. В. Выбор способа утилизации золошлаковых материалов Новочеркасской ГРЭС с применением метода анализа иерархий Т. Саати	54
Труханов В. М., Султанов М. М., Кухтик М. П., Курьянова Е. В., Горбань Ю. А. Планирование объемов испытаний опытных образцов на этапе создания теплоэнергетического оборудования	62

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Неуймин В. М. О замещении турбины Т-250/300-23,5 ст. №9 Филиала «ТЭЦ-22» ПАО «МОСЭНЕРГО»	68
Судаков А. В., Легкоступова В. В., Григорьев К. А., Кругликов П. А. Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.....	75

ИНФОРМАЦИЯ..... 83

ПАМЯТИ В. В. КУДРЯВОГО..... 84

ХРОНИКА, ПУБЛИКАЦИИ..... 85

МЕТАФОРИЗМЫ И ФАКТЫ..... 90

CONTENTS

GENERAL ISSUES OF RELIABILITY AND SAFETY OF ENERGY

Lebedeva L. M., Kovalev G. F., Krupenev D. S. Standardization of the adequacy of electric power systems and formation of the reserve of the generating capacity	4
Filippova A. G., Nurieva A. Z., Naumkin E. A., Kuzeev I. R. Evaluation of potential hazard of installations of fuel and energy complex enterprises.....	14
Nepomnyashchiy V. A. Investigation of the reliability of the IPS of South in connection with the acquisition of new concentrated loads (part 1)	21

DESIGN, RESEARCH, CALCULATIONS

Kachuriner Y. Ya., Kruglikov P. A., Grigoryev K. A. Engineering method for calculating initial condensation parameters in high-speed water vapor streams	30
Gavrilov S. N., Gaev A. V., Nikitin V. I., Pigrova G. D. Main features of using the shock pulse method for vibration diagnostics of turbogenerator stators.....	36
Vysogorets S. P. Development of method for quick analysis of isolation oil performance parameters.....	41
Lapteva E. A., Shagieva G. K., Laptev A. G. Purification of water from dissolved gases in a film unit with discrete-rough walls.....	48
Fedorova N. V., Efimov N. N., Fedorov Yu. V. Selection of a method of recycling ash and slag materials of Novocherkassk power plant (Novocherkassk GRES) using the Saaty analytic hierarchy process	54
Trukhanov V. M., Sultanov M. M., Kukhtik M. P., Kuryanov E. V., GorbanYu. A. Planning of Prototype Test Amounts at Creation Stage of Heat-power Equipment	62

OPERATIONAL PRACTICE

Neuymn V. M. The replacement of the T-250/300-23,5 turbine at power unit no. 9 Of CHPP-22, MOSENERGO PJSC.....	68
Sudakov V. A., Legkostupova V. V., Grigoryev K. A., Kruglikov P. A. Modernization of moisture separator-reheaters of NPP with VVER-440 and VVER-1000 reactors.....	75

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-4-13
УДК: 621.311

Нормирование балансовой надежности электроэнергетических систем и формирование резерва генераторной мощности

Лебедева Л. М., Ковалёв Г. Ф., Крупенёв Д. С.

ФГБУН Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
ул. Лермонтова 130, 664033, г. Иркутск, Россия
Поступила / Received 20.09.2017

Принята к печати / Accepted for publication 12.02.2018

Статья посвящена актуальному вопросу определения необходимого полного резерва генераторной мощности для заданного уровня балансовой надежности (БН) при управлении развитием и функционированием Единой электроэнергетической системы Российской Федерации. Проблема резервирования энергетических мощностей — это, прежде всего, проблема обеспечения надежности систем энергетики, систем электроснабжения потребителей. Наличие резервов — это лишь один (хотя и основной) из способов обеспечения надежности (в том числе, надежное и качественное оборудование, регулярные и качественные ремонты, высокопрофессиональное обслуживание, материальное и финансовое снабжение и другие меры). В плане нормирования надежности электропотребления целесообразно нормировать БН, а не резервы генераторных мощностей. Это связано как с общепринятой практикой (в том числе и зарубежной), так и с тем, что норматив БН определяет и необходимый резерв генераторной мощности и его размещение в системе с учетом пропускных способностей межсистемных связей. В статье делается акцент на тесную взаимозависимость БН и полного резерва мощности. Очевидно, что чем выше БН, тем больше должен быть резерв. Исходя из требования, принимать тот или иной норматив БН, авторами предлагается оценивать и рассчитывать ее показатели, в том числе вероятности безотказной работы. Резерв, получаемый в результате расчетов и соответствующий нормативу БН, следует считать полным и необходимым (но не нормативным) для поддержания заданного уровня БН. В статье на примере ОЭС Сибири проанализированы и показаны результаты только трех расчетов. Многовариантные расчеты действительно показали, что анализ показателей адекватности позволяет получить не только необходимый резерв мощности, но и определить территории, где необходимо принять соответствующие меры для обеспечения надежности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Балансовая надежность, резерв мощности, полный резерв, вероятность, норматив, территориальная зона, пропускная способность, располагаемая мощность.

Адрес для переписки:

Лебедева Л. М.
ФГБУН Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
ул. Лермонтова 130, 664033, г. Иркутск, Россия
e-mail: lebedeva@isem.irk.ru

Address for correspondence:

Lebedeva L. M.
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Lermontov St., 130, 664033, Irkutsk, Russian
e-mail: lebedeva@isem.irk.ru

Для цитирования:

Лебедева Л. М., Ковалёв Г. Ф., Крупенёв Д. С. Нормирование балансовой надежности электроэнергетических систем и формирование резерва генераторной мощности. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1, с. 4 – 13.
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-4-13.

For citation:

Lebedeva L. M., Kovalev G. F., Krupenev D. S. [Standardization of the adequacy of electric power systems and formation of the reserve of the generating capacity]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no.1, pp. 4 – 13 (in Russian).
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-4-13.

Standardization of the adequacy of electric power systems and formation of the reserve of the generating capacity

Lebedeva L. M., Kovalev G. F., Krupenev D. S.

*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS)
Lermontov Street, 130, 664033, Irkutsk, Russia*

The paper is devoted to the topical issue of determining the required total capacity reserve for a given level of adequacy when managing the development and operation of the Unified Electric Power System of the Russian Federation. The problem of reserving energy capacities is, first of all, the problem of ensuring the reliability of energy systems, electrical power supply systems. Whereas the reserves themselves are only one of the ways (though the main one) to ensure reliability, in particular, reliable and high-quality equipment, regular and high-quality repairs, highly professional services, material and financial supply and other measures. In terms of standardization the reliability of power consumption, it is advisable to standardize the adequacy, and not the reserves of generating capacities. This is due both to the generally accepted practice (including foreign ones) and to the fact that the adequacy standard determines both the required reserve of generating capacity and its placement in the system, taking into account the capacity of the ties. However, in this paper, the main emphasis is on the close interdependence between adequacy and total capacity reserve. Obviously, the higher the adequacy, the larger the reserve should be. Based on the requirement to apply one or another adequacy standard, authors offer to assess and calculate the adequacy indices including the probability of failure-free operation. Moreover, the calculated reserve should be considered complete and necessary, but not normative, to maintain the given level of adequacy. The paper analyzes and shows only three calculations on the example of the IPS of Siberia. Multivariate calculations have really shown that analyzing the indicators of adequacy allows you to get not only the required capacity reserve, but also see those territories where it is necessary to take appropriate measures to ensure reliability.

KEY WORDS. Adequacy, capacity reserve, total reserve, probability, reliability, standard (normative), territorial area, transmission capacity, available capacity.

Введение

Обеспечение надежного снабжения потребителей электроэнергией является приоритетной задачей при управлении электроэнергетическими системами (ЭЭС). При этом нормирование показателей надежности используется на всех этапах функционирования и во всех иерархических уровнях ЭЭС. Создание комплексной системы взаимосогласованных (непротиворечивых) нормативов надежности для всех территориальных и временных уровней управления технологическими звеньями ЭЭС и различных единичных свойств надежности — это сложная научно-техническая и организационная задача. Для решения этой задачи требуется объединение усилий специалистов разного профиля (техников, математиков, экономистов, финансистов, юристов) из разных организаций и компаний: научно-исследовательских, проектных, эксплуатационных, правительственных, законодательных, страховых и т. д. Форма экономических отношений в обществе, качество жизни, особенности формирования ЭЭС и их объединений — все это оказывает влияние на систему нормативов. Этим объясняется различие систем нормативов надежности разных стран и разных энергокомпаний [1].

Нормирование надежности в электроэнергетике имеет достаточно длительную историю. Оно органично связано с нормированием и стандартизацией всех аспектов формирования и эксплуатации ЭЭС как производственной отрасли. Все нормы и стандарты, в том

числе и по надежности, как правило, фиксируются в директивных материалах: Руководящих указаниях, нормативах, правилах устройства и эксплуатации, СНиП, справочниках, стандартах организаций и т. п. Формирование документов, содержащих только нормативы надежности объектов ЭЭС, также возможно. Нормативы периодически подвергаются пересмотру, изменениям, дополнениям в связи с изменением внешних и внутренних условий функционирования ЭЭС и ее элементов, появлением нового оборудования и новых технологий, разработкой новых методов и средств управления, разных форм собственности, новых подходов к проблеме надежности и т. д.

Говоря о достаточно полной и взаимоувязанной системе нормативов в электроэнергетике, следует отметить, что проблема остается открытой и требует своего решения. У специалистов имеются различные мнения по составу нормативов надежности в ЭЭС. Одни считают, что нормирование надежности должно сводиться к выбору количественной оценки минимального числа показателей надежности вплоть до одного — вероятности бездефицитной работы ЭЭС [2]. Другие за то, чтобы регламентированы были и прямые характеристики, и косвенные «правила надежности», процедуры принятия решений по надежности ЭЭС и вычислительные модели для расчетов надежности, а также расчетные схемы, условия и исходные данные. Примером такого подхода служат стандарты надежности для крупных энергосистем Северной Америки [3].

В принципе, отношение к нормативам надежности

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-14-20
УДК 665.642.2

Оценка потенциальной опасности объектов предприятий топливно-энергетического комплекса

Филиппова А. Г., Нуриева А. З., Наумкин Е. А., Кузеев И. Р.

ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет
ул. Космонавтов 1, 450062, г. Уфа, Россия

Поступила / Received 01.06.2017

Принята к печати / Accepted for publication 02.02.2018

Эксплуатация оборудования на объектах топливно-энергетического комплекса сопряжена с повышенным уровнем потенциальной опасности возникновения аварийной ситуации. Это связано с тем, что в технологическом процессе используется значительный объем взрывопожароопасных веществ. При этом оборудование эксплуатируется при повышенных температурах и давлениях, а многие среды, используемые при контакте с материалом, обладают повышенной коррозионной активностью. При разрушении объектов на любой стадии развития аварийной ситуации наиболее весомый негативный вклад вносят три фактора — пожароопасность, взрывоопасность и токсическое заражение.

Согласно действующим нормативно-техническим документам существует несколько подходов к определению этих опасностей. Однако, используя полученные результаты, сложно принимать решения и планировать мероприятия по снижению потенциальной опасности аварийного разрушения и предсказанию сроков достижения критического состояния объектов топливно-энергетического комплекса.

В связи с этим ранее для оценки потенциальной опасности оборудования опасных производственных объектов было предложено использование интегрального параметра (ИП), который отражает все категории опасности, определяемые согласно существующим методикам расчета. Однако, расчет ИП в данных работах учитывает только физическую природу происхождения опасностей, но не дает возможности оценить текущее состояние и спрогнозировать период безопасной эксплуатации.

Таким образом, особую актуальность приобретает совершенствование метода оценки опасности на основе комплексного анализа количественных характеристик аварий на нефтегазоперерабатывающих предприятиях, основой которого должен стать комплексный ИП потенциальной опасности, учитывающий не только взрывоопасность, пожароопасность, токсическое поражение, но и степень деградации материала каждого оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пожароопасность, взрывоопасность, токсическое заражение, мониторинг накопленных повреждений, интегральный параметр опасности.

Адрес для переписки:

Филиппова А. Г.
ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет
ул. Космонавтов 1, 450062, г. Уфа, Россия
e-mail: Albina_22@bk.ru

Address for correspondence:

Filippova A. G.
Ufa State petroleum technological university
Kosmonavtov Str., 1, 450062, Ufa, Russia
e-mail: Albina_22@list.ru

Для цитирования:

Филиппова А. Г., Нуриева А. З., Наумкин Е. А., Кузеев И. Р.
Оценка потенциальной опасности установок предприятий топливно-энергетического комплекса. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – с. 14 – 20.
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-14-20.

For citation:

Filippova A. G., Nurieva A. Z., Naumkin E. A., Kuzeev I. R.
[Evaluation of potential hazard of fittings of fuel and energy complex enterprises]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 14 – 20.
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-14-20.

Evaluation of potential hazard of installations of fuel and energy complex enterprises

Filippova A. G., Nurieva A. Z., Naumkin E. A., Kuzeev I. R.

*FSBEI HE Ufa State petroleum technological university
Kosmonavtov Str. 1, 450062, Ufa, Russia*

Operation of equipment at facilities of the fuel and energy complex is associated with an increased level of potential hazard of an emergency situation. This is due to the fact that a significant amount of explosive and fire hazardous substances is used in the technological process. At the same time, the equipment is operated at elevated temperatures and pressures, and many media used for contact with the material have increased corrosive activity. When-ever objects are disrupted at any stage of the emergency development, three most significant adverse contributing factors are fire hazard, explosion hazard and toxic contamination.

According to the current regulatory and technical documents, there are several approaches to identifying these hazards. However, using the results obtained, it is difficult to make decisions or plan actions to reduce the potential hazard of emergency destruction and predict the timing of the critical state of the fuel and energy complex facilities.

In this regard, earlier, in order to assess the potential danger of equipment of hazardous industrial facilities, it was proposed to use an integral parameter that reflects all hazard categories calculated according to the existing calculation procedures. However, the calculation of the integral parameter in these works only takes into account the physical nature of the origin of the hazards, while not enabling to assess the current state or to predict the safe operation period.

Thus, improvement of the hazard assessment method on the basis of comprehensive analysis of quantitative characteristics of accidents at oil and gas refineries, to be based on a complex integral parameter of potential hazard, taking into account not only the explosion hazard, fire hazard, and toxic damage, but also the degree of degradation of the material of each equipment, is of particular relevance.

KEYWORDS: fire hazard, explosion hazard, toxic contamination, monitoring of accumulated damage, integral hazard parameter.

Введение

На предприятиях ТЭК реализуются процессы переработки различных видов углеводородного сырья и производится большой объем товарных нефтепродуктов. В качестве сырья, продуктов и полуфабрикатов установок нефтепереработки выступают смеси углеводородов, которые обладают взрывопожароопасными свойствами. Эти производственные объекты всегда сопряжены с потенциальной опасностью для человека и экосистемы [1].

Поражающие факторы разнообразны по физической природе и возникают на любых стадиях развития аварий, но наибольший вклад вносят три фактора — пожароопасность¹, взрывоопасность² и токсическое заражение³.

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств». Серия 09. Выпуск 37. – 2-е изд., доп. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 126 с.

² ГОСТ 12.3.047-2012 «Национальный стандарт РФ. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» – Введ. 01.01.2014. – М., 2014. – 86 с.

³ РД 52.04.253-90 «Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте» – Введ. 01.07.1990. – СПб, 2000. – 19 с.

Кроме того, при длительной эксплуатации оборудования нефтеперерабатывающих производств (НПП) неизбежно возникают повреждения или нарушения работоспособности его элементов даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации.

Анализ состояния промышленной безопасности показал, что износ основного технологического оборудования опасных производственных объектов (ОПО) достигает до 70%⁴. Оборудование продолжает эксплуатироваться только за счет запаса прочности, конструктивно заложенного при его изготовлении. Замена оборудования на предприятиях ведется крайне медленными темпами, не всегда обеспечивается своевременное проведение экспертизы зданий и сооружений на ОПО, не соблюдаются сроки вывода из эксплуатации и замены изношенного оборудования.

Поэтому возникает необходимость в определении потенциальной опасности оборудования и оптимального периода вывода его из эксплуатации.

В связи с этим ряд исследователей [2–5] для оценки потенциальной опасности оборудования ОПО предложил использование ИП, который отражает все категории опасности, такие как взрывоопасность, пожароопасность,

⁴ Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016 году. – М.: «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. – 397 с.

DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-21-29

УДК 621.311.1.51

Исследование надежности ОЭС Юга в связи с присоединением новых сосредоточенных нагрузок (часть 1)

Непомнящий В. А.

Липовский проезд, 3а, кв. 15, 188541, г. Сосновый бор Ленинградской области, Россия

Поступила / Received 01.06.2017

Принята к печати / Accepted for publication 02.02.2018

Рассматриваются вопросы надежности функционирования магистральных сетей 500–220 кВ ОЭС Юга и влияние присоединения новых нагрузок на их работу.

В 1-й части статьи показано, что уже в настоящее время действующие магистральные сети имеют уровень надежности (вероятность бесперебойной работы) 0,980, что соответствует продолжительности аварийных состояний сетей 175 ч/год.

С подключением новых потребителей нагрузка магистральных сетей 500–330 кВ существенно возрастает, что резко снижает резерв их пропускной способности и понижает надежность их функционирования, особенно в периоды проведения планово-профилактических ремонтных работ в сетях 500 кВ.

Передача электроэнергии и мощности из ОЭС Юга в дополнительную новую энергосистему по действующим магистральным сетям в пределах 800–850 МВт особенно в летний период (в период проведения ремонтных кампаний) существенно снижает надежность их работы до вероятности бесперебойного функционирования 0,965. Это увеличивает вероятную длительность аварийных состояний сети до 300–310 ч/год и может стать источником системных аварий, особенно в режимах с плановыми ремонтами основных ЛЭП 500 кВ, приводящими к понижению пропускной способности сети.

Близкая к предельным значениям нагрузка магистральных сетей 500–330–220 кВ в доаварийных нормальных режимах создает дополнительные негативные условия их функционирования, так как в этих случаях аварийные отключения даже малоответственных в режимном отношении линий электропередачи может стимулировать развитие системных аварий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Надежность, системные аварии, ущерб, схема электроснабжения.

Investigation of the reliability of the IPS of South in connection with the acquisition of new concentrated loads (part 1)

Nepomnyashchiy V. A.

Lipovskiy proezd, 3a, fl.15, 188541, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

The paper considers the matters of operational reliability of 500–220 kV trunk networks of the IPS of South and the impact of connection of new loads.

As is shown in part 1 of the paper, at present the operating trunk networks have had the reliability level (the probability of failsafe operation) at 0.980, which corresponds to the duration of emergency conditions of networks at 175 hrs per annum.

Адрес для переписки:

Непомнящий В. А.

Липовский проезд, 3а, кв. 15, 188541, г. Сосновый бор Ленинградской области, Россия

e-mail: nva.sbor@mail.ru

Address for correspondence:

Nepomnyashchiy V. A.

Lipovskiy proezd, 3a, fl.15, 188541, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

e-mail: nva.sbor@mail.ru

Для цитирования:

Непомнящий В. А. Исследование надежности ОЭС Юга в связи с присоединением новых сосредоточенных нагрузок (часть 1). Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – С. 21–29.

DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-21-29.

For citation:

Nepomnyashchiy V. A. [Investigation of the reliability of the IPS of South in connection with the acquisition of new concentrated loads (part 1)]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 21–29 (in Russian).

DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-21-29.

With the connection of new consumers the load on 500–330 kV trunk networks has increased significantly, which has sharply reduced their throughput capacity margin and lowered their operational reliability, particularly at periods of scheduled maintenance work on 500 kV networks.

The transfer electric energy and power from the IJS of the South in additional new energy system on existing backbone networks in the range of 800–850 MW, especially in the summer (during the maintenance campaigns) significantly reduces their operational reliability considerably to the failsafe operation probability of 0.965. This extends the probable duration of emergency conditions of network up to 30–310 hrs a year and may become a source of systemic emergencies, especially in operating modes with scheduled repair of the main 500 kV power transmission lines that would predetermine a decline in the throughput capacity of the network.

Loading the 500–330–220 kV trunk networks to levels close to the limit values in pre-emergency normal operating modes creates additional adverse conditions for their operation, as in these cases emergency shutdowns of even low criticality power transmission lines could stimulate development of systemic emergencies.

KEYWORDS: Reliability, system emergencies, damage, power supply arrangement.

В настоящее время Объединенная энергосистема (ОЭС) Юга включает в себя Астраханскую, Волгоградскую, Дагестанскую, Калмыцкую, Карачаево-Черкесскую, Кабардино-Балкарскую, Кубанскую, Ростовскую, Северо-Осетинскую, Ставропольскую, Чеченскую и Ингушскую энергосистемы, а с 2015 года к ней была присоединена и Крымская энергосистема. ОЭС Юга объединяет магистральными сетями 500–330–220 кВ Ростовскую АЭС, Ново-Черкасскую ГРЭС на угле и газе, Ставропольскую и Невинномысскую ГРЭС на газе, Волжскую ГЭС а также ряд ТЭЦ и ГЭС

средней и малой мощности Ростовской области, Северного Кавказа и Краснодарского края. ОЭС обеспечивает также параллельную работу ЕЭС России с энергосистемами Украины, Азербайджана и Грузии. Общая установленная генерирующая мощность ОЭС Юга в 2016 году составляла 20,6 млн. кВт при располагаемой мощности 19,62 млн. кВт и годовой выработке электроэнергии 96,24 млрд. кВт·ч. Динамика установленных и располагаемых генерирующих мощностей ОЭС Юга в 2013–2016 гг. приведена в таблице 1.

При этом производство электроэнергии по ОЭС Юга с

Таблица 1. Установленные и располагаемые мощности и производство электроэнергии электростанциями ОЭС Юга в 2013–2016 гг.
Table 1. Installed and net dependable capacities and electric power output of the IPS of South in the period of 2013–2016.

Наименование станции Types of stations	2013 г. / 2013		2014 г. / 2014		2015 г. / 2015		2016 г. / 2016	
	Установлен- ная мощ- ность млн. кВт Installed capacity, million kW	Произ- водство электро- энергии млн. кВт·ч Electric power output, mill. kW·h	Установ- ленная мощность млн. кВт Installed capacity, million kW	Производ- ство элек- троэнергии млн. кВт·ч Electric power output, mill. kW·h	Установ- ленная мощность млн. кВт Installed capacity, million kW	Произ- водство электро- энергии млн. кВт·ч Electric power output, mill. kW·h	Установ- ленная мощность млн. кВт Installed capacity, million kW	Производ- ство элек- троэнергии млн. кВт·ч Electric power output, mill. kW·h
ТЭС TRP	11 382,7	42 617,4	11 189,5	49 043,6	9 539,7	48 673,2	9 812,6	50 084,8
ГЭС HPP	5 634,9	22 048,6	5 646,6	18 879,3	5 756,1	18 422,9	5 931,2	21 049,1
АЭС NPP	2 000,0	17 135,7	3 070,0	15 704,9	3 000,0	20 509,3	3 000,0	24 000,7
ВЭС WPP	0,0	0,0	0,0	0,0	1 600,0	3,8	1 600,0	2,8
Блок-станции промпред- приятий Isolated generating plants of industrial enterprises	284,8	1 040,3	263,9	1 130,0	221,0	947,9	257,9	1 103,7
Всего по ОЭС Юга The IPS of the South, total	19 302,4	82 842,0	20 170,0	84 757,8	20 116,8	88 556,2	20 601,7	96 241,1
Располагаемая мощность Net dependable capacity	17 181,0	xxx	18 045,0	xxx	19 227,0	xxx	19 620,0	xxx

Примечание: Здесь и далее все показатели по ОЭС Юга приводятся по данным отчетов Системного Оператора ЕЭС России¹.

¹ Отчеты о функционировании ЕЭС России в 2013–2016 гг. Ресурсы Интернета. http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2017/ups_rep2016.pdf.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-30-35

УДК 621.175.1

Инженерный метод расчета параметров начальной конденсации в высокоскоростных потоках водяного пара

Качуринер Ю. Я., Кругликов П. А., Григорьев К. А.

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

ул. Атаманская, д. 3/6, 191167, Санкт-Петербург, Россия

Поступила / Received 22.02.2017

Принята к печати / Accepted for publication 01.02.2018

Излагается приближенный метод расчета газо- и термодинамических параметров гомогенно конденсирующихся высокоскоростных потоков пара, в том числе в проточных частях паровых турбин и другом энергетическом оборудовании. Точный расчет спонтанной конденсации, базирующийся на общей теории многофазных течений и кинетической теории ядрообразования в паре, учитывает кинетику процесса и требует использования современных, достаточно сложных компьютерных программ. Разработанный приближенный метод, учитывающий все принципиальные физические особенности реального потока, позволяет определить параметры потока достаточно просто, используя результаты систематических точных расчетов. В соответствии с реальным потоком течение разделяется на три области: полного переохлаждения, фронта конденсации, термодинамического равновесия. Расчеты в области переохлаждения и термодинамического равновесия выполняются как для изоэнтропийно расширяющегося идеального газа с разными для каждой из областей значениями показателя адиабаты. Конец области переохлаждения определяется значением порогового переохлаждения, а начало области термодинамического равновесия — протяженностью собственно фронта. Критериями, определяющими эти параметры, выбраны градиент расширения проходной площади канала и давление на линии насыщения при изоэнтропном расширении потока. Местоположение и протяженность конденсационного фронта определяются по обобщенным диаграммам, построенным по результатам систематических расчетов, выполненных по программному комплексу «Влажный пар». Изменение параметров в самом конденсационном фронте определяется по известным газодинамическим соотношениям для теплового сопла. Приводится сравнение точного и приближенного расчета с опытом, показывающее удовлетворительную точность метода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инженерный метод расчета, начальная конденсация, водяной пар, влажнопаровые ступени турбин, определяющие критерии, параметры паровой и капельной влаги.

Адрес для переписки:

Качуринер Ю. Я.
ОАО «НПО ЦКТИ»
ул. Атаманская, д. 3/6, 191167, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: turbina@ckti.ru

Address for correspondence:

Kachuriner Y. Ya.
JSC «NPO CKTI»
Atamanskaya str., 3/6, 191167, Saint-Petersburg, Russia
e-mail: turbina@ckti.ru

Для цитирования:

Качуринер Ю. Я., Кругликов П. А., Григорьев К. А. Инженерный метод расчета параметров начальной конденсации в высокоскоростных потоках водяного пара. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – С. 30–35.
DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-30-35.

For citation:

Kachuriner Y. Ya., Kruglikov P. A., Grigoryev K. A. [Engineering method for calculating initial condensation parameters in high-speed water vapor streams]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 30–35 (in Russian).
DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-30-35.

Engineering method for calculating initial condensation parameters in high-speed water vapor streams

Kachuriner Y. Ya., Kruglikov P. A., Grigoryev K. A.

Joint-Stock Company «I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment»
(«NPO CKTI»)

Atamanskaya str., 3/6, 191167, Saint-Petersburg, Russia

An approximate method for calculating the gas and thermodynamic parameters of homogeneously condensing high-speed steam streams is described, including calculation of steam turbines and other power equipment flow sections. The exact calculation of spontaneous condensation, based on the general theory of multiphase flows and the kinetic theory of nucleation in a vapor, takes into account the kinetics of the process, and requires the use of modern, rather complex computer programs. The developed approximate method that takes into account all the fundamental physical features of the real flow makes it possible to determine the flow parameters quite simply, using the results of systematic accurate calculations. In accordance with the actual flow, the current is divided into three regions: total supercooling, condensation front, thermodynamic equilibrium. Calculations in the supercooling region and thermodynamic equilibrium are performed for an isentropically expanding ideal gas with different adiabatic values for each of the values. The end of the supercooling region is determined by the threshold supercooling value, and the beginning of the thermodynamic equilibrium region is determined by the extension of the front itself. The gradient of the channel area expansion and the pressure on the saturation line under isentropic expansion of the flow are chosen as the criteria determining these parameters. The location and extension of the condensation front are determined from generalized diagrams constructed from the results of systematic calculations performed by the «Wet Steam» program complex. The change in the parameters in the condensation front itself is determined from the known gas-dynamic relations for the heat nozzle. A comparison of the exact and approximate calculation with experiment is given, showing the satisfactory accuracy of the method.

KEYWORDS: engineering calculation method, initial condensation, water vapor, wet steam stages of turbines, defining criteria, steam and capillary moisture parameters.

В высокоскоростных потоках слабо перегретого или насыщенного пара, в том числе в проточных частях влажнопаровых турбинных ступеней, начальная конденсация носит, если не принимается соответствующих мер, гомогенный характер и происходит с большими отклонениями от термодинамического равновесия [1–2]. Процесс проходит через две стадии — переохлаждения и конденсационного фронта («скачка конденсации»), развивающегося по достижении достаточно высокого порогового переохлаждения. Во фронте вследствие резкого влагообразования выделяется большое количество тепла, переохлаждение падает¹ практически до нуля, и дальнейшее расширение потока влажного пара происходит с малыми отклонениями от термодинамического равновесия. Одновременно вследствие конденсации уменьшается и расход паровой фазы, что приводит к уменьшению скорости и повышению давления.

Разработанные на базе общей теории многофазных потоков [3] и кинетической теории нуклеации [4] методы расчета и созданные реализующие их расчетные программы, позволяющие детально определять характеристики паровой и жидкой фаз потока в процесс начальной конденсации [5–6], достаточно сложны и требуют специальной подготовки для их использова-

ния. Поэтому на начальных этапах проектирования желательно иметь приближенные инженерные методы определения характерных параметров потока в области начальной конденсации. К ним, в первую очередь, относятся местоположение и интенсивность конденсационного фронта, параметры потока за ним и на выходе из канала или решетки лопаточных профилей, а также оценка опасности возникновения конденсационной нестационарности.

Ниже излагаются основные положения такого метода, в основе которого лежит физическая модель неравновесной гомогенной начальной конденсации в одномерном потоке, и используются результаты систематических расчетов таких потоков в широком диапазоне параметров работы влажнопаровых турбинных ступеней [7]. При этом, как это принято в практике расчетов, поток в целом принимается адиабатическим и изоэнтропийным, а потери учитываются поправками к конечному результату расчета. Точность таких расчетов иллюстрирует график на рисунке 1, где показано сравнение расчетов с опытами многих авторов. Как видно, погрешность расчетов по определению положения конденсационного фронта в области низких давлений не превышает 5%.

Область переохлаждения

При расширении пара ниже пограничной кривой поток считается полностью переохлажденным и одно-

¹ В дозвуковом потоке в области околосзвуковых скоростей переохлаждение может увеличиваться, особенно при малых градиентах расширения потока.

DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-36-40

УДК 621.313

Особенности использования метода ударных импульсов при вибрационной диагностике статоров турбогенераторов

Гаврилов С. Н., Гаев А. В., Никитин В. И., Пигрова Г. Д.

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова»

ул. Атаманская, 3/6, 191167, Санкт-Петербург, Россия

Поступила / Received 02.11.2017

Принята к печати / Accepted for publication 01.02.2018

Статья посвящена расчетно-экспериментальному исследованию вибрационного состояния элементов торцевых зон статоров мощных турбогенераторов.

В связи с особенностями конструкции и условиями работы при совместном воздействии температурных и нестационарных электромагнитных полей, конструктивные элементы торцевых зон статоров мощных турбогенераторов подвержены вибрации. Чрезмерные уровни вибрации в конструкции ведут к возникновению усталостных трещин в вибронегруженных элементах и выходу их из строя с последующим остановом генератора и, как следствие, целого энергоблока.

В связи с этим создание надежно работающей электрической машины является важной и актуальной научно-технической задачей.

Для решения подобных задач в настоящее время активно применяются различные расчетные и экспериментальные методики, которые зачастую используются независимо друг от друга.

Особенностью настоящей работы является совместное использование современных расчетных и экспериментальных методов для решения задачи по обеспечению виброненадежности элементов торцевых зон статоров мощных турбогенераторов.

Рассмотрены вопросы вибрационной диагностики статоров турбогенераторов методом ударных импульсов с целью повышения вибрационной надежности. Выполнено численное моделирование импульсного динамического воздействия на модель выводного конца мощного турбогенератора. Модель состоит из шинодержателя, жестко закрепленного по основанию элемента нажимной плиты, и выводного конца с композитной изоляцией. Физико-механические свойства изоляции приняты в соответствии с результатами расчетно-экспериментальных исследований. Результаты расчетных исследований позволили определить зависимости регистрируемых откликов от места и длительности удара, а также выбрать точку приложения импульса в зависимости от формы колебаний. Разработаны рекомендации по проведению вибрационной диагностики методом ударных импульсов на примере выводных шин статоров турбогенераторов, позволяющие увеличить уровень получаемых сигналов и повысить вероятность обнаружения всех форм колебаний в требуемом диапазоне частот.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: турбогенератор, статор, вибрационная диагностика, собственные частоты, формы колебаний, численное моделирование.

Адрес для переписки:

Гаврилов С. Н.

ОАО «НПО ЦКТИ»

ул. Атаманская 3/6, 191167, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: GavrilovSN@ckti.ru

Address for correspondence:

Gavrilov S. N.

JSC «NPO CKTI»

Atamanskaya str., 3/6, 191167, Saint-Petersburg, Russia

e-mail: GavrilovSN@ckti.ru

Для цитирования:

Гаврилов С. Н., Гаев А. В., Никитин В. И., Пигрова Г. Д. Особенности использования метода ударных импульсов при вибрационной диагностике статоров турбогенераторов. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – С. 36–40.

DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-36-40.

For citation:

Gavrilov S. N., Gaev A. V., Nikitin V. I., Pigrova G. D. [Main features of using the shock pulse method for vibration diagnostics of turbogenerator elements]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 36–40 (in Russian).

DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-36-40.

Main features of using the shock pulse method for vibration diagnostics of turbogenerator stators

Gavrilov S. N., Gaev A. V., Nikitin V. I., Pigrova G. D.

Polzunov Central Boiler & Turbine Institute

Atamanskaya str., 3/6, 191167, Saint-Petersburg, Russia

The present work is devoted to the calculation and experimental study of the vibrational state of the stator end zone elements at high-power turbogenerators.

Due to the design features and operating conditions under the combined effect of temperature and non-stationary electromagnetic fields, the structural elements of the stator end zones at powerful turbo generators are subject to vibration. Excessive levels of the structure vibration lead to the appearance of fatigue cracks in the vibration-loaded elements and their subsequent failure, leading to the stop of the generator and, as a consequence, the whole power unit.

In this regard, the creation of a reliable electric machine is an important and urgent scientific and technical task.

To solve such problems, various computational and experimental methods are being actively used at present, which are often used independently of each other.

A feature of this work is the joint use of modern design and experimental methods for solving the problem of ensuring vibrational reliability of the end zone elements of stators at powerful turbo-generators.

The paper considers the use of the method of shock impulses for vibration diagnostics of turbogenerator stators, in order to increase the vibrational reliability. Numerical simulation of the impulse dynamic impact on the end winding element of a powerful turbogenerator is performed. The model comprises a bus holder rigidly fixed on the base of the pressure plate, and an output end with composite insulation. The physical and mechanical properties of insulations are assumed according to results of design and experimental studies. The results of computation studies have made it possible to determine the dependencies of the recorded responses on the location and duration of the impact, and also to select the point of pulse application, depending on the shape of the oscillations. Recommendations for conducting vibration diagnostics by shock pulses have been developed on the example of output busbars of turbo generator stators, which allow to increase the level of received signals and the probability of detecting all forms of oscillations in the required frequency range.

KEY WORDS: turbogenerator, stator, vibration diagnostics, natural frequencies, vibration modes, numerical simulation.

Вибрационная диагностика — это метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации (частота, виброскорость, виброперемещение, виброускорение). Основным источником вибрации элементов статора является сердечник, испытывающий гармоническое электромагнитное воздействие с частотой 100 Гц (для двухполюсного генератора). Повышенная вибрация является основной причиной, приводящей к повреждениям элементов статоров [1]. Для обеспечения вибрационной надежности конструкции необходимо выполнить вибрационную отстройку собственных частот элементов статора в диапазоне 90–120 Гц. В силу имеющейся значительной неопределенности в условиях закрепления элементов на этапах изготовления и монтажа статора основой при вибрационной отстройке является экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) системы.

При проведении вибродиагностики на неработающем генераторе часто используется метод ударных импульсов [2, 3]. Статья посвящена анализу особенностей использования данного метода при проведении вибродиагностики. Рассмотрены результаты численного моделирования и верификации на тестовых задачах.

Для решения задачи численного моделирования процесса вибродиагностики ударным методом была создана конечно-элементная модель, разработанная с использованием методики анализа и оценки вибра-

ционного состояния токоведущих элементов электрических машин с композитной изоляцией [4–6]. Модель состоит из шиндержателя, жестко закрепленного по основанию элемента нажимной плиты, и выводного конца с композитной изоляцией. Физико-механические свойства изоляции приняты в соответствии с результатами расчетно-экспериментальных исследований [7–10]

С помощью расчетной модели решена серия динамических задач о возбуждении вибрации выводного конца ударными импульсами различной длительности. Был выполнен анализ отклика системы и влияния места приложения ударной нагрузки, а также длительности импульса.

Численное моделирование вибродиагностики методом ударных импульсов

Проведена оценка влияния места приложения и длительности ударного импульса на точность получаемых результатов.

Для проведения указанной оценки выполнено численное моделирование импульсного динамического воздействия на модель выводного конца мощного турбогенератора. С целью снижения размерности задачи разработана расчетная модель, состоящая из шиндержателя, жестко закрепленного по основанию элемента нажимной плиты и вы-

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-41-47
УДК 621.311

Разработка методики экспресс-анализа параметра качества изоляционного масла

Высогорец С. П.

ПАО «МРСК Северо-Запада»

Площадь Конституции, д. 3, литера «А», 196247, г. Санкт-Петербург, Россия

Поступила / Received 01.06.2017

Принята к печати / Accepted for publication 02.02.2018

Физико-химический анализ трансформаторных масел является надежным инструментом, позволяющим влиять на эффективность регенерационных работ: контролировать технологический цикл, определять точку завершения процедур при проведении ремонтных работ. Правильный выбор контрольных параметров с последующей разработкой методов их экспресс-анализа позволит перенести физико-химический контроль из стационарных лабораторий к месту непосредственного проведения ремонтных работ (в полевые условия), что позволит повысить качество и эффективность ремонтной деятельности.

Минеральное трансформаторное масло является значимым элементом маслonaполненного оборудования, влияющим как на его надежность, так и на долговечность. Важнейшими эксплуатационными характеристиками трансформаторного масла являются химическая стабильность и химическая стойкость. Доказано, что кислотное число (КЧ) является ключевым показателем качества, позволяющим косвенно с высокой степенью достоверности оценивать изменение (ухудшение) вышеуказанных свойств масла и его ресурса.

Поставлена задача разработки экспресс-анализа показателя КЧ. В ходе реализации пробного эксперимента предложено использование смешанного индикатора, продемонстрировано его эффективное применение при реализации разработанного экспресс-метода.

На основе результатов исследований разработан алгоритм подготовки и проведения экспресс-измерения КЧ, изложены критерии оценки результатов его полуколичественного измерения экспресс-методом.

В ходе экспериментальных измерений КЧ экспресс-методом проведена оценка компонентного состава окраски реакционных растворов в пробирках при реакции нейтрализации с помощью прикладного программного обеспечения «Цветоанализатор ColorAnalyzer» согласно модели RGB. На лепестковой диаграмме продемонстрирована зависимость изменения характера распределения цветовой гаммы в анализируемой модели RGB от количественного содержания кислот (измеренного значения КЧ).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка, трансформаторное масло, показатели качества, методика.

Адрес для переписки:

Высогорец С. П.
ПАО «МРСК Северо-Запада»
площадь Конституции, д. 3, литера «А», 196247
г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: s-151075@yandex.ru

Address for correspondence:

Vysogorets S. P.
PJSC «IDGC of the North-West»
Constitution Square, 3«A», 196247, St. Petersburg, Russia
e-mail: s-151075@yandex.ru

Для цитирования:

Высогорец С. П. Разработка методики экспресс-анализа параметра качества изоляционного масла. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – С. 41–47.
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-41-47.

For citation:

Vysogorets S. P. [Development of method for quick analysis of isolation oil performance parameters]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 41–47 (in Russian).
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-41-47.

Development of method for quick analysis of isolation oil performance parameters

Vysogorets S. P.

PJSC «IDGC of the North-West»

Constitution Square, 3«А», 196247, St. Petersburg, Russia

Physico-chemical analysis of transformer oils is a reliable tool that allows to increase the efficiency of regeneration works: to control the technological cycle, to determine the point of procedures completion during repair work. Correct choice of control parameters with subsequent development of methods for their quick analysis will allow to transfer physico-chemical control from stationary laboratories directly to the site of repair work (in the field), which will improve the quality and efficiency of repair activities.

Mineral transformer oil is an important element of oil-filled equipment, affecting both its reliability and durability. The most important performance characteristics of transformer oil are chemical stability and chemical resistance. It has been proved that the Acid Value indicator is a key quality indicator which allows indirectly to assess the change in / deterioration of the above properties of oil, and oil resource.

The task is set to develop a quick analysis of the Acid Value indicator. During the implementation of the pilot experiment, it was suggested to use a mixed indicator, and its effective application was demonstrated in the developed quick method.

Based on research, an algorithm was developed for preparation and carrying out the quick analysis of Acid Value, and the criteria were outlined for estimating the results of Acid Value semiquantitative measurement with the use of the quick method.

In the course of experimental measurements of the Acid Value with the use of the quick method, the colour component composition of reaction solutions in test tubes was evaluated during a neutralization reaction using the «Цветоанализатор ColorAnalyzer» software according to the RGB model. The dependence of the change in the colour pattern on the quantitative content of acids (the measured Acid Value) in the analysed RGB model was demonstrated on a petal diagram.

KEY WORDS: evaluation, transformer oil, quality indicators, methods.

Введение

Стареющий парк оборудования неизбежно ведет к росту затрат на сервисное обслуживание, в т. ч. ремонтные работы. Сопутствующими работами при средних и капитальных ремонтах маслонаполненного оборудования являются работы по регенерации трансформаторных масел. Качество выполненных регенерационных работ непосредственно влияет на продолжительность межремонтного периода, а, следовательно, на надежность, долговечность и эффективность эксплуатации отремонтированного маслонаполненного оборудования.

Физико-химический анализ трансформаторных масел является надежным инструментом, позволяющим влиять на эффективность регенерационных работ: контролировать технологический цикл, определять точку завершения процедур. Вместе с этим проведение контрольных лабораторных измерений сопряжено с необходимостью транспортировки проб в стационарные химические лаборатории со значительными потерями времени. Поиск минимального набора контрольных параметров и разработка методов их экспресс-анализа позволит повысить как качество выполнения ремонтных работ маслонаполненного оборудования, так и их эффективность со значительным сокращением времени на выполнение ряда операций.

Минеральное трансформаторное масло как элемент, влияющий на надежность и долговечность маслонаполненного оборудования

Процессы, протекающие в изоляции маслонаполненного оборудования, затрагивают, прежде всего, пропитывающее минеральное масло и распространяются на твердые целлюлозные материалы (бумагу, картон). В настоящее время разработаны теоретические положения о фундаментальных процессах старения отдельных компонентов изоляции — масла и бумаги [1, 2].

Так, надежная работа силовых трансформаторов напрямую зависит от качества залитых трансформаторных масел и процессов, протекающих в них. При этом основной срок службы силовых трансформаторов определяется степенью разрушения твердой изоляции (ее механическим состоянием), которая тесно связана с окислительными процессами, протекающими в эксплуатационном трансформаторном масле, а именно, с продуктами, образующимися в процессе старения [3]. Важно, что восстановить механическую прочность целлюлозной изоляции невозможно, а вот предотвратить ее разрушение вполне реально, при этом качество выполнения работ по регенерации масла непосредственно влияет на содержание продуктов окисления в масле, скорость их образования, а, в конечном итоге, и на состояние целлюлозной изоляции оборудования.

Повреждения изоляции являются результатом

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-48-53

УДК 621.311.22

Очистка воды от растворенных газов в пленочном аппарате с дискретно-шероховатыми стенками

Лаптева Е. А., Шагиева Г. К., Лаптев А. Г.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

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

Поступила / Received 20.03.2017

Принята к печати / Accepted for publication 22.01.2018

Для решения задач повышения ресурсоэффективности и надежности различного оборудования, работающего с применением водооборотных систем на промышленных предприятиях и ТЭС, рассмотрен высокоэффективный пленочный аппарат очистки воды от растворенных коррозионно-активных газов. Аппарат состоит из пучка вертикальных труб, закрепленных в трубных решетках, и работает в режиме восходящего прямого тока газа и жидкости по трубному пространству. Газ движется со скоростью 10–30 м/с (сильное взаимодействие фаз) и увлекает жидкую пленку снизу вверх. В таком режиме происходит значительная интенсификация тепло- и массообмена (в 5–15 раз) по сравнению с противотоком. Кроме этого, внутренние поверхности труб могут иметь искусственную дискретную шероховатость (прямоугольные выступы), что дополнительно повышает эффективность проводимых процессов. Представлены математическая модель и результаты расчета эффективности пленочного контактного устройства с шероховатыми стенками при сильном взаимодействии фаз. Математическое описание базируется на моделях структуры потока и диффузионного пограничного слоя. Приведены выражения для расчета коэффициента массоотдачи в турбулентной пленке при прямом токе с газом, а также параметров моделей структуры потоков в контактной трубке. Основными параметрами уравнения для расчета коэффициента массоотдачи является динамическая скорость трения на межфазной поверхности пленки и безразмерная толщина вязкого подслоя. Динамическая скорость находится из уравнения баланса сил в контактной трубке, а безразмерная толщина вязкого подслоя — на основе известного значения на пластине с коррекцией на условия взаимодействия фаз. Использована ячеечная модель структуры потока и получено выражение для расчета профиля концентрации растворенного газа в воде по высоте труб. Представлено выражение для расчета числа ячеек полного перемешивания.

Даны расчетные и экспериментальные зависимости эффективности декарбонизации для трубок с гладкими и шероховатыми стенками. Показано влияние шага между элементами шероховатости (выступами) на эффективность очистки воды. Сделаны выводы о конструктивном исполнении аппарата с восходящей пленкой при повышенных концентрациях растворенных газов в воде.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: очистка воды, математическая модель, пленочные аппараты, шероховатость поверхности, деаэратор, декарбонизатор.

Адрес для переписки:

Лаптев А. Г.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

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

e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Address for correspondence:

Laptev A. G.

Kazan state energy University

Krasnoselskaya, 51, 420066 Kazan, Russia

e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Для цитирования:

Лаптева Е. А., Шагиева Г. К., Лаптев А. Г. Очистка воды от растворенных газов в пленочном аппарате с дискретно-шероховатыми стенками. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т.11, №1 – с. 48–53. DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-48-53.

For citation:

Lapteva E. A., Shagieva, G. K., Laptev A. G. [Purification of water from dissolved gases in the film unit with a discrete-rough walls]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol., no. , pp. 48–53 (in Russian).

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-48-53.

Purification of water from dissolved gases in a film unit with discrete-rough walls

Lapteva E. A., Shagieva G K., Laptev A. G.

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

This paper analyzes the use of a highly effective film unit for water purification from dissolved corrosive gases, in order to increase the resource efficiency and reliability of various equipment using water circulation systems at industrial plants and thermal power plants. The unit consists of a vertical bundle of tubes contained in tube grids and operates in the upward co-current gas and liquid in a pipe. The gas moves at a speed of 10–30 m/s (strong interaction of phases) and carries a liquid film from the bottom up. In this mode, there is a significant intensification of heat and mass transfer (5–15 times) in comparison with counter current. In addition, the inner surface of the tubes may have artificial discrete roughness (rectangular projections), which further increases the effectiveness of the processes. The paper presents the mathematical model and the efficiency calculation results for a film contact device with rough walls at strong phase interaction. The mathematical description is based on the models of the flow structure and the diffusion boundary layer. Expressions are given for calculating the mass transfer coefficient in a turbulent film with co-current gas, as well as parameters of the flow structure model in a contact tube. The main parameters of the equation for calculation of the mass transfer coefficient are the dynamic friction velocity on the interfacial film surface and the dimensionless thickness of the viscous sublayer. The dynamic speed is calculated using the equation of balance of forces in the contact tube, and the dimensionless thickness of the viscous sublayer-based on the known values on the plate adjusted for the phase interaction conditions. The cell model of the flow structure is used, and an expression is obtained for calculating the concentration profile of gas dissolved in water at the height of the pipes. The paper also presents an expression to calculate the number of cells in a complete mixing.

The paper presents the calculated and experimental dependences of decarbonization efficiency for tubes with smooth and rough walls. The influence of spacing between roughness elements (projections) on water purification efficiency is shown. Conclusions are made about the design of a unit with a rising film at higher concentrations of dissolved gases in the water.

KEYWORDS: water purification, mathematical model, film-type units, surface roughness, deaerators, decarbonators.

Введение

В статье рассмотрена задача очистки жидкости от растворенных газов в аппаратах с дискретно-шероховатыми стенками и с дисперсно-кольцевыми потоками. Такие задачи актуальны для повышения ресурсоэффективности и надежности оборудования для различных предприятий и тепловых электрических станций (ТЭЦ и ТЭС). Растворенными газами чаще всего являются CO_2 , O_2 , H_2S и др. Процессы очистки организуются в насадочных, тарельчатых, струйных и комбинированных аппаратах [1–8]. Ниже представлена математическая модель и пример расчета для контактного устройства с шероховатой стенкой при прямотоке (рисунок 1). Математическое описание базируется на моделях структуры потоков и модели диффузионного пограничного слоя. Нисходящий или восходящий прямоток организуется при скорости газа $w_T > 7–8$ м/с (при нормальных условиях) в контактных трубках и называется режимом сильного взаимодействия газа и пленки жидкости. При таком режиме процессы тепло- и массообмена интенсифицируются в 5–15 раз по сравнению с противотоком [9–13].

В аппараты может подаваться теплоагент для создания необходимого температурного режима.

Эффективность очистки воды

Для расчета эффективности массопередачи теоретическим путем, прежде всего, необходимо определить поля скоростей фаз на контактном устройстве, а затем из решения уравнения массопереноса рассчитать поле концентраций и определить концентрацию на выходе. Тогда эффективность (коэффициент полезного действия) разделения смеси имеет вид

$$E_{\text{ж}} = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{к}}}{C_{\text{н}} - C^*}, \quad (1)$$

где $C_{\text{н}}$, $C_{\text{к}}$ — начальная и конечная концентрация компонента в жидкости; C^* — равновесная концентрация, зависит от температуры и парциального давления. При $C_{\text{к}} = C^*$ имеем эффективность $E_{\text{ж}} = 1$ (100%), что на практике не достигается. Для декарбонизаторов и термических деаэраторов достаточно иметь $E_{\text{ж}} = 0,98–0,99$.

Для сокращения времени расчетов физических полей и эффективности разделения широкое применение получили модели структуры потоков (диффузионная и ячейчатая), которые позволяют с достаточной для практических целей точностью решать поставленные задачи.

Примем ячейчатую модель с делением контактного

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-54-61
УДК 628.477.7:338.22.021.4:519.816

Выбор способа утилизации золошлаковых материалов Новочеркасской ГРЭС с применением метода анализа иерархий Т. Саати

Федорова Н. В.¹, Ефимов Н. Н.¹, Федоров Ю. В.²

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова
Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

² Южный федеральный университет
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

Поступила / Received 21.12.2017

Принята к печати / Accepted for publication 16.02.2018

Утилизация золы и шлака угольных ТЭС является проблемой для всех стран, использующих уголь в энергетических целях. В России 20% электроэнергии производится на тепловых электростанциях, сжигающих уголь, и согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 г. не планируется снижать эту долю. Всего в мире в золошлакоотвалах к настоящему времени накоплено свыше 1,5–2 млрд т золошлаковых отходов (ЗШО). Площадь золошлакоотвалов в РФ достигает 28 тыс. га, при этом утилизируется и используется не более 8% годового выхода ЗШО, который составляет около 30–50 млн т. Затраты на содержание ЗШО составляют 5–7% себестоимости производства энергии на угольной ТЭС. В настоящее время разработан ряд способов утилизации золошлаков, учитывающих их физико-химические свойства, особенности формирования и складирования, потребности и возможности переработки техногенного сырья. На рынке спецтехники предлагаются линейки соответствующего оборудования, создаются предприятия и организации, готовые утилизировать золошлаки. Возникает задача многокритериального выбора оптимального способа утилизации. Для решения задач выбора стратегии из ряда альтернативных вариантов с 70-х годов XX века успешно применяется метод анализа иерархий, разработанный американским математиком Т. Саати. Данная работа посвящена применению метода Саати к выбору способа утилизации золошлаковых материалов Новочеркасской ГРЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: утилизация золы и шлака угольных ТЭС, выбор стратегии модернизации промышленного объекта, метод анализа иерархий Саати.

Адрес для переписки:

Федорова Н. В.
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова
Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132
e-mail: fedorovanv61@rambler.ru

Address for correspondence:

Fedorova N. V.
Platov South State Polytechnic University (NPI)
Russia, 346428 Rostov Region, Novocherkassk, Prosveschenia Str., 132
e-mail: fedorovanv61@rambler.ru

Для цитирования:

Федорова Н. В., Ефимов Н. Н., Федоров Ю. В. Выбор способа утилизации золошлаковых материалов Новочеркасской ГРЭС с применением метода анализа иерархий Т. Саати. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – С. 54–61.
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-54-61.

For citation:

Fedorova N. V., Efimov N. N., Fedorov Yu. V. [Selection of a method of recycling ash and slag materials of Novocherkassk power plant (Novocherkassk GRES) using the Saaty analytic hierarchy process]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 54–61 (in Russian).
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-54-61.

Selection of a method of recycling ash and slag materials of Novocherkassk power plant (Novocherkassk GRES) using the Saaty analytic hierarchy process

Fedorova N. V.¹, Efimov N. N.¹, Fedorov Yu. V.²

¹ Platov South State Polytechnic University (NPI)
Russia, 346428 Rostov Region, Novocherkassk, Prosveschenia Str., 132

² Southern Federal University
Russia, 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42

Recycling of ash and slag produced by coal-fired thermal power plants is a problem of all countries that use coal for energy purposes. In Russia, 20% of electric energy is produced by thermal power plants that burn coal. According to the 'Energy Strategy of Russia for the period until 2030' that part is not going to be reduced. Globally, ash dumps have accumulated more than 1.5–2 billion tons of ash and slag waste (ASW) to date. In Russia, ash dumps cover an area of almost 28 thousand hectares. At the same time, less than 8% of the annual ASW output is recycled and reused (30 to 50 million tons). The cost of the ASW handling is 5–7% of the total net price of the energy produced by thermal power plants. Currently there are several methods to recycle the ASW that consider their physical and chemical properties, peculiarities of forming and stockpiling, needs and possibilities for recycling technogenic raw materials. The market of special purpose machines offers ranges of relevant equipment, new factories and companies ready to recycle ASW are being created. This leads to a multivariate problem of choosing the optimal way to recycle the waste. Since the 1970s, the analytic hierarchy process developed by the US mathematician T. Saaty has been used to solve problems of choosing a strategy out of a number of alternative options. This paper is devoted to application of the Saaty process to selection of a method for recycling ash and slag materials produced by Novocherkassk power plant.

KEYWORDS: recycling of ash and slag of coal thermal power plants, choice of strategy of industrial facility modernization, Saaty analytic hierarchy process.

Новочеркасская ГРЭС (НЧГРЭС) установленной мощности 2,4 ГВт работает с середины 60-х годов XX века. Основным топливом является уголь Донецкий АШ и природный газ. В отвалах Новочеркасской ГРЭС сейчас накоплено более 52 млн тонн ЗШО,¹ хранение которых связано с рядом экологических, экономических и иных проблем. Площадь золошлакоотвалов увеличивается ежегодно на 1 га. При этом в золошлаках содержится ряд ценных химических элементов и соединений², что позволяет рассматривать их как техногенное сырье, т. е. золошлаковые материалы (ЗШМ). В настоящее время разработан ряд технологий по сепарации и утилизации ЗШМ [1–5]. Крупнотоннажная утилизация ЗШМ возможна в промышленном, гражданском и дорожном строительстве, при мелиорации.

Выбор направления утилизации ЗШМ должен учитывать как состав и физико-химические свойства золошлаков, так и возможности и потребности региона расположения ТЭС. Для выбора стратегии из ряда альтернативных вариантов в различных сферах человеческой деятельности, в том числе при модернизации

промышленных объектов, с 70-х годов XX века успешно применяется метод анализа иерархий Саати [6–14]. Данная работа посвящена применению метода Саати к выбору способа утилизации ЗШМ НЧГРЭС.

Принимаем ограничения: стратегию выбора определяет собственник НЧГРЭС — ОАО ОГК-2; он же является инвестором, который при минимизации затрат желает получить максимальную прибыль; увеличение площади золошлакоотвалов не допускается, т. е. необходимо утилизировать минимум 80–100 т/ч ЗШМ,

Цель прогнозирования — выбор способа утилизации ЗШМ НЧГРЭС.

Рассматриваемые **альтернативные проекты** (рисунки 1):

1) БП / WR — без переработки / without recycling (вывоз ЗШМ с целью крупнотоннажного строительства, мелиорации, ликвидации горных выработок, для переработки за пределами ГРЭС),

2) МС / MS — дробление и простейшая пневматическая механическая сепарация смеси ЗШМ / grinding and mechanical separation (получение фракций, применяемых в дальнейшем в строительстве, дорожном строительстве, в очистных сооружениях),

3) УМ / CM — выделение недожога углерода и магнитная сепарация железосодержащей фракции золы / collection of unburned carbon and magnetic separation (возврат недожога в энергетические котлы ГРЭС, продажа магнитной фракции потребителю за пределами Ростовской области), а также дробление и механическая сепарация шлака,

¹ Инвестиционный портал Октябрьского района Ростовской области [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ostobinvest.ru/region/news/news_337.html. — Заглавие с экрана (дата обращения: 12.12.2017).

² Тепловой расчет котлов. Нормативный метод / коллектив авторов; под ред. Н. В. Кузнецова и др. — 2-е изд., перераб. / Репринтное воспроизведение издания 1973 г. — М.: ЭКОЛИТ, 2011. — 296 с.

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-62-67

УДК 621.192

Планирование объемов испытаний опытных образцов на этапе создания теплоэнергетического оборудования

Труханов В. М.^{1,2}, Султанов М. М.¹, Кухтик М. П.², Е. В. Курьянова¹, Горбань Ю. А.¹

¹ Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском
пр. им. В. И. Ленина, 69, г. Волжский, Россия, 404110

² ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
пр. им. В. И. Ленина, 28, г. Волгоград, Россия, 400005

Поступила / Received 23.03.2018

Принята к печати / Accepted for publication 26.03.2018

Рассматривается проблема планирования объема испытаний комплектующих составных частей теплоэнергетического оборудования на этапе испытаний опытных образцов. Существующие методы планирования испытаний относятся к изделиям крупносерийного и массового производства, когда на испытания можно поставить большое количество элементов; в гидромеханических системах при испытаниях новых образцов уплотнений, клапанов, подшипников и т. п. Комплектующие составные части теплоэнергетического оборудования представляют собой устройства, состоящие из совокупности элементов механического, электронного, гидравлического, пневматического и другого типа, например, турбины, подшипники, генераторы, маслосистема, паропроводы и т. п. Перечисленные устройства являются дорогостоящими, и поэтому существующие методы планирования объема испытаний требуют уточнения.

В основу предлагаемого метода планирования объема испытаний положено условие восстанавливаемости испытуемого опытного образца после отказа путем проводимых конструктивных доработок. В этом случае риск разработчика (изготовителя) принимается близким к нулю $\alpha = 0,00001$. Доработка считается эффективной, если проведенные испытания на стенде в том же объеме, что и до доработки, окажутся успешными.

Таким образом, новизна предлагаемого метода планирования испытаний позволяет на одном или двух опытных образцах получить требуемые выходные характеристики, например, надежность, безопасность и т. п.

Рассмотрены методы планирования объема испытаний для различных законов распределения функции надежности, в частности, для законов биномиального и экспоненциального распределения функции надежности.

В статье приведены формулы объемов испытаний для двух заданных уровней показателя надежности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: планирование испытаний, теплоэнергетическое оборудование, надежность, законы распределения.

Адрес для переписки:

Труханов В. М.
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
пр. им. В. И. Ленина, 28, г. Волгоград, Россия, 400005
e-mail: trukhanov1939@mail.ru

Address for correspondence:

Trukhanov V. M.
Volgograd State Technical University
Lenin av., 28, Volgograd, Russia, 400005
e-mail: trukhanov1939@mail.ru

Для цитирования:

Труханов В. М., Султанов М. М., Кухтик М. П., Курьянова Е. В., Горбань Ю. А. Планирование объемов испытаний на этапе создания теплоэнергетического оборудования. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. – 11, №1. – с. 62–67.
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-62-67.

For citation:

Trukhanov V. M., Sultanov M. M., Kukhtik M. P., Kuryanova E. V., Gorban Y. A. [Planning of Testing Amounts at Stage of Creation of Heat-power Equipment]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 62 – 67 (in Russian).
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-62-67.

Planning of Prototype Test Amounts at Creation Stage of Heat-power Equipment

Trukhanov V. M.^{1,2}, Sultanov M. M.¹, Kukhtik M. P.², Kuryanov E. V.¹, Gorban Y. A.¹

¹ Volzhsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Lenin av., 69, Volzhsky, Russia, 404110

² Volgograd State Technical University

Lenin av., 28, Volgograd, Russia, 400005

The article is devoted to a problem of planning of tests' amounts of the completing components of the heat power equipment on a test phase of prototypes. The existing methods of test planning belong to large-lot products and mass production when it is possible to deliver a large number of elements on tests; in hydromechanical systems in case of testing new samples of multiplexing, valves, bearings, etc. The feature of the completing components of the heat power equipment is that they represent the devices consisting of set of elements of mechanical, electronic, hydraulic, pneumatic and other type, for example, turbines, bearings, generators, an oil system, steam lines, etc. The listed devices are expensive and therefore the existing methods of planning of test amounts demand specification.

The condition of restorability of the examinee of a prototype after refusal by the carried out constructive completions is the basis for the offered method of planning of tests amounts. In this case the risk of the developer (manufacturer) is accepted close to zero $\alpha=0,00001$. Completion is considered effective if the carried-out tests at the stand in the same volume, as before completion, are successful.

Thus, the novelty of the offered method of planning of test amounts allows to receive on one or two prototypes the required output characteristics, for example, reliability, safety, etc.

In this article the methods of planning of test amounts for various laws of distribution of function of reliability are considered. In a particular, methods of planning of volume of tests for the law of distribution of function of reliability of a continuous random variable in the form of normal and exponential laws.

In this article the formulas of test amounts for two set reliability indicator levels are given.

KEYWORDS: planning of testing, heat-power equipment, reliability, distribution laws.

Известно, что в процессе испытаний опытных образцов комплектующих составных частей теплоэнергетического оборудования последние браковке не подвергаются из-за большой их стоимости. Отказавшие составные части после выявления причины отказа дорабатываются, а затем испытания продолжают [1, 2]. Для подтверждения эффективности доработки необходимо повторить испытания по той же программе и в том же объеме. Доработка считается эффективной, если после повторных испытаний отказов не наблюдалось.

В теплоэнергетике, на этапе создания современных модулей автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) с функцией расчетов и прогнозирования показателей экономичности генерирующих мощностей ТЭС теоретические исследования по планированию проведения испытаний нового дорогостоящего оборудования нижнего и верхнего уровней АСУ ТП является весьма актуальными. Аналогичные задачи преследуют проектировщики по созданию нового теплоэнергетического оборудования распределенной генерации, например, разработчики мини-ТЭС с газотурбинными и парогазовыми генераторами, анализ и планирование объемов испытаний которых до создания собственно объектов требует теоретических исследований по оценке показателей надежности.

Существуют различные методы планирования объе-

мов испытаний, в частности, планирование испытаний методом фиксированного объема [3–6].

С целью сокращения объемов испытаний в настоящей статье рассматривается метод последовательного анализа с двухсторонней доверительной границей. В отличие от существующего метода последовательного анализа [7–10] в настоящей статье предлагается риск поставщика (изготовителя) принимать близким к нулю $\alpha = 0,00001 = 0,001\%$ за счет проводимых доработок.

Основное отличие последовательного анализа от метода фиксированного объема состоит в том, что количество испытаний для подтверждения оцениваемого параметра функции надежности является случайной величиной и не определяется заранее. Суть метода последовательного анализа состоит в том, что на основании отношения произведений плотностей распределения оцениваемого параметра принимается решение о правильности гипотезы H_0 или H_1 . Такое отношение называют отношением правдоподобия, которое записывается в виде

$$\frac{P_1}{P_0} = \prod_{i=1}^n \frac{f(m_i, \theta_1)}{f(m_i, \theta_0)} \quad (1)$$

где P_1 — допустимая вероятность безотказной работы; P_0 — требуемая вероятность безотказной работы; n — число испытаний; m — число отказов в i -ом испытании; θ_1 — допустимое значение наработки до отказа;

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-68-74
УДК 621.165

О замещении турбины Т-250/300-23,5 ст. №9 Филиала «ТЭЦ-22» ПАО «МОСЭНЕРГО»

Неуймин В. М.

ООО «Технологические системы защитных покрытий»
16-я Парковая ул., д. 27, 105484, Москва, Россия

Поступила / Received 12.12.2017

Принята к печати / Accepted for publication 02.02.2018

В России установлено 22 энергоблока с турбинами Т-250/300-23,5: 19 энергоблоков на ТЭЦ Москвы и 3 энергоблока на ТЭЦ Санкт-Петербурга. Полный установленный срок службы паровой турбины составляет не менее 40 лет, поэтому турбины, выпущенные в 70-х годах, уже предстоит заменить, реконструировать или модернизировать. Принятая ООО «Газпром энергохолдинг» и ПАО «Мосэнерго» политика не содержит конкретных технических решений по замещению турбин указанного типа или энергоблоков на их основе, что вызвало некоторые трудности при выборе варианта для замены выведенной из эксплуатации турбины энергоблока №9 филиала «ТЭЦ-22» ПАО «Мосэнерго». ТЭЦ-22 — единственная ТЭЦ московского региона, способная сжигать природный газ и пылеугольное топливо. На электростанции вместо турбины Т-250/300-23,5 с температурой пара перед турбиной и температурой промперегрева 540/540°C предполагается установить турбину Т-295/335-23,5 с температурой пара перед турбиной и температурой пара промперегрева 565/565°C. Контракт на реконструкцию оборудования не предполагает обновления эксплуатируемого парогенератора энергоблока и проведения соответствующих работ по сокращению выбросов при сжигании пылеугольного топлива. Эти обстоятельства приведут к тому, что энергоблок не сможет эксплуатироваться при повышенной температуре пара, не будет и возможности перехода от сжигания природного газа к пылеугольному топливу; придется использовать исключительно природный газ. Принятый вариант реконструкции энергоблока №9 ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго» приведет к повышенным затратам энергетиков на проводимую реконструкцию оборудования энергоблока, что может привести к увеличению тарифов на электроэнергию и тепло.

Необходимо оперативно определиться с эффективными направлениями обновления турбин Т-250/300-23,5 и энергоблоков на их основе, вынести предложенное решение на обсуждение с участием заинтересованной научной общественности страны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергоблок, турбина, замещение, назначенный ресурс, установленный срок службы, конкурентоспособность, эффективность.

Адрес для переписки:

Неуймин В. М.
ООО «Технологические системы защитных покрытий»
16-я Парковая ул., д. 27, 105484, Москва, Россия
e-mail: neva333@yandex.ru

Address for correspondence:

Neuimin V. M.
ООО Process Protective Coating Systems
16-ya Parkovaya str., d. 27, 105484, Moscow, Russia
e-mail: neva333@yandex.ru

Для цитирования:

Неуймин В. М. О замещении турбины типа Т-250/300-23,5 ст. №9 филиала «ТЭЦ-22» ПАО «МОСЭНЕРГО». Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – С. 68 – 74.
DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-68-74.

For citation:

Neuimin V. M. [The replacement of the T-250/300-23,5 turbine at power unit no. 9 Of CHPP-22, MOSENERGO PJSC]. Na-dezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 68 – 74. (in Russian).
DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-1-68-74.

The replacement of the T-250/300-23,5 turbine at power unit no. 9 Of CHPP-22, MOSENERGO PJSC

Neuimin V. M.

ООО «Technological systems for protective coatings»

16-ya Parkovaya str., d. 27, 105484, Moscow, Russia

There are 22 power units with T-250/300-23,5 turbines in Russia: 19 power units at CHPPs in Moscow and 3 power units at CHPPs in St. Petersburg. The total specified service life of a steam turbine is at least 40 years, therefore, the turbines produced in the 1970s already need to be replaced, reconstructed or modernized. The technical policy adopted by Gazprom Energoholding LLC and Mosenergo PJSC does not present any solutions for replacement of the said turbines and units. This made it difficult to choose an option for replacing a decommissioned turbine of power unit No. 9 of CHPP-22, Mosenergo PJSC. CHPP-22 is the only CHPP in the Moscow region, capable of burning natural gas and pulverized coal. The plant plans to replace the T-250/300-23,5 turbine with the turbine-entry steam temperature and the reheat temperature of 540/540°C with a T-295/335-23,5 turbine with the turbine-entry steam temperature and the reheat temperature of 565/565°C. The equipment reconstruction contract does not involve any update of the steam generator used at the power unit or carrying out works to reduce emissions from the combustion of pulverized coal. This will make it impossible for the unit to operate at higher steam temperature, and there will be no possibility to switch from natural gas to pulverized-coal fuel; it will only be possible to use natural gas. The adopted version of the reconstruction of power unit No. 9 of CHPP-22, Mosenergo PJSC will lead to increased costs of the power unit equipment reconstruction, which may lead to increased tariffs for electricity and heat supply.

It is necessary to quickly come up with an effective way to upgrade T-250/300-23,5 turbines and units using those, and to submit a solution for a comprehensive discussion with the participation of the interested national scientific community.

KEYWORDS: power unit, turbine, replacement, assigned resource, specified service life, competitiveness, efficiency.

Существующее состояние

На ТЭЦ Москвы и Санкт-Петербурга эксплуатируются 22 энергоблока с теплофикационными паровыми турбинами типа Т-250/300-23,5 (Т-250). Проект турбины разработан в 1967 г.; серийное производство начато с 1971 г.

Полный установленный срок службы этой турбины составляет не менее 40 лет¹. Расчетный срок службы энергетических котлов энергоблоков ТЭС также составляет не менее 40 лет². Такой же срок службы имеют и турбогенераторы³. Расчетный ресурс паропроводов в зависимости от номинальных параметров острого пара и типоразмеров определяется техническими условиями на их поставку. Полный срок службы силовых масляных трансформаторов составляет не менее 25 лет⁴. При подготовке к реконструкции энергоблока любого типа или ТЭС с поперечными связями сроки службы используемого в тепловой схеме электростанции оборудования должны учитываться (согласовываться).

¹ ГОСТ 24278-89 Установки турбинные паровые стационарные для привода электрических генераторов ТЭС. Общие технические требования. – М.: Изд. Стандартов, 1989.

² ГОСТ Р 50831-95 Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. – М.: ИПК Изд. стандартов, 1996.

³ ГОСТ 533-2000 Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд. стандартов, 2001.

⁴ ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М.: Изд. стандартов, 1985.

Анализ работы электростанций ОЭС «Центра» и потоков мощности из других ОЭС единой энергосистемы свидетельствует об избыточности установленной мощности по отношению к текущему спросу на электроэнергию; основные системообразующие электростанции на базе энергоблоков паросиловых установок (ПСУ) уступают по себестоимости производства электроэнергии аналогичным показателям энергоблоков ПГУ (особенно с ростом цен на энергоносители внутри страны). Энергоблоки ПСУ введены в эксплуатацию в первой половине 70-х годов минувшего века. На них используются турбины мощностью 200–800 МВ (К-200, К-300, Т-250 и К-800). На сегодня происходит вытеснение существующих генерирующих мощностей на ТЭС в Европейской части страны [1]. В среднесрочной и отдаленной перспективе существенный рост энергопотребления и теплотребления в стране не просматривается.

В московской энергосистеме до 2010 г. парковый ресурс (ПР) [2] выработан пятью турбинами Т-250, в 2011 — 2020 гг. ПР выработают двенадцать турбин Т-250, а после 2020 г. — еще две турбины. Отметим, что ПР эквивалентен сроку эксплуатации турбин сверхкритического давления (СКД) в течение 24 лет при их использовании в среднем 6400 ч/год и общем числе пусков не более 600. Кроме России, показатель ПР в мировой практике нигде не используется. В электроэнергетике страны действует норматив, в соответствии с которым из-за фактора неопределенности при назначении ресурса (НР) или назначении срока службы (НСС) оборудования не разрешается единовременно продлевать его более, чем на 50 тыс. ч или на 8 лет (не-

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-75-82

УДК 621.311.25

Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000

Судаков А. В., Легкоступова В. В., Григорьев К. А., Кругликов П. А.

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

ул. Атаманская, 3/6, Санкт-Петербург, 191167, Россия

Поступила / Received 05.04.2017

Принята к печати / Accepted for publication 31.01.2018

Сепараторы-пароперегреватели (СПП) предназначены для сепарации влаги из пара и последующего его перегрева. Проектная влажность пара после осушки в сепараторе СПП должна быть не более 1%, однако в эксплуатации она превышает этот уровень, что сказывается на эффективности и надежности турбины.

В связи с истечением проектного срока эксплуатации аппараты СПП-220М и СПП-1000 требуют замены либо модернизации. Конструкции СПП-220М и СПП-1000 унифицированы с СПП-500-1, и все эти аппараты имеют общие достоинства и недостатки.

Отмечено, что ведущие зарубежные фирмы, поставляющие СПП на АЭС, также ведут работы по совершенствованию своих аппаратов. Изложен опыт немецкой фирмы Balcke Durr, принимавшей участие совместно с ОАО «НПО ЦКТИ» в модернизации СПП-500-1 на АЭС в России, а также самостоятельно в проекте модернизации СПП на АЭС Ловииса в Финляндии.

Приведены результаты разработок ОАО «НПО ЦКТИ» по проектам модернизации СПП-220М для энергоблока с реактором ВВЭР-440 и СПП-1000 для энергоблока с реактором ВВЭР-1000. Проекты выполнены на основе собственного опыта и с учетом опыта совместных разработок с фирмой Balcke Durr. Они разработаны при соблюдении следующих условий: новые аппараты устанавливаются на прежние фундаменты; аппараты вписываются в прежние габариты; расположение присоединительных фланцев позволяет сохранить существующую обвязку аппаратов трубопроводами. Расчетное обоснование проекта включало вычислительный эксперимент на основе разработанной авторами модели СПП, а также теплогидравлические расчеты. Численное моделирование позволило провести оптимизацию конструкции сепарационных блоков, а теплогидравлические расчеты — оптимизацию конструкции пароперегревателя.

На основе расчетных оценок показано, что модернизация аппаратов может обеспечить осушку влажного пара на уровне 0,6%, понизить гидравлическое сопротивление по тракту влажного пара на 26% для СПП-220М и на 36% для СПП-1000, а также уменьшить массу аппаратов на 12%.

Предложены рекомендации по модернизации существующих и созданию перспективных конструкций СПП.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сепаратор-пароперегреватель (СПП), турбоустановка, водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), атомная электрическая станция (АЭС), модернизация.

Адрес для переписки:

Судаков А. В.

ОАО «НПО ЦКТИ»

ул. Атаманская, д. 3/6, Санкт-Петербург, 191167, Россия

e-mail: atom24@ckti.ru

Address for correspondence:

Sudakov A. V.

JSC «NPO CKTI»

Atamanskaya str., 3/6, 191167, Saint Petersburg, Russia

e-mail: atom24@ckti.ru

Для цитирования:

Судаков А. В., Легкоступова В. В., Григорьев К. А., Кругликов П. А. Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №1. – С. 75 – 82.

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-75-82.

For citation:

Sudakov A. V., Legkostupova V. V., Grigoryev K. A., Kruglikov P. A. [Modernization of moisture separator-reheaters of NPP with reactors VVER-440 and VVER-1000]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 75 – 82 (in Russian).

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-75-82.

Modernization of moisture separator-reheaters of NPP with VVER-440 and VVER-1000 reactors

Sudakov V. A., Legkostupova V. V., Grigoryev K. A., Kruglikov P. A.

Joint-Stock Company «I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment» («НПО CKTI»)

Atamanskaya str., 3/6, Saint-Petersburg, 191167, Russia

Moisture separator-reheaters (MSR) are designed to separate the moisture from steam and its subsequent overheating. The design moisture of the steam after drying in the MSR separator should not be more than 1%, however, in operation it exceeds this level, which affects the efficiency and reliability of the turbine.

In connection with the expiry of the design lifetime, the SPP-220M and the SPP-1000 devices require replacement or modernization. The structures of SPP-220M and SPP-1000 are unified with SPP-500-1, and all these devices have common advantages and disadvantages.

It is noted that the leading foreign companies that supply the MSR to NPPs are also working to improve their devices. The experience of the German company Balcke Durr, which took part jointly with JSC «НПО CKTI» in the modernization of SPP-500-1 at nuclear power plants in Russia, as well as independently in the project of modernization of the MSR at the Loviisa NPP in Finland, is presented.

The results of the development of JSC «НПО CKTI» on the modernization of an SPP-220M for the power unit with a VVER-440 and an SPP-1000 reactor for the power unit with a VVER-1000 reactor are presented. The projects are executed on the basis of JSC «НПО CKTI»'s own experience and taking into account the experience of joint development with the Balcke Durr firm. The projects are designed taking into account the following conditions: new devices are installed on existing foundations; devices are fit into the old dimensions; the location of connecting flanges allows to keep the existing pipelines.

The design basis for the project included a computational experiment based on an MSR model developed by the authors, as well as thermal hydraulics calculations. Numerical simulation allowed to optimize the design of separation units. Thermohydraulic calculations made it possible to optimize the superheater design.

Based on the calculation results, it is shown that the modernization of the apparatus will allow to dry the wet steam at 0.6%, to lower the hydraulic resistance along the wet steam path by 26% for the SPP-220M and 36% for the SPP-1000, and to reduce the weight of the apparatus by 12%.

Recommendations are proposed for the modernization of existing and the creation of promising structures for MSR.

KEYWORDS: moisture separator-reheater (MSR), turbine unit, water-water energetic reactor (VVER), nuclear power plant (NPP), modernization.

В настоящее время на АЭС в мире эксплуатируется 23 энергоблока с реакторами ВВЭР-440, 36 — с ВВЭР-1000 и 11 — с РБМК-1000. Турбины этих энергоблоков (К-220-44, К-1000-60 и К-500-65/3000 соответственно) работают на насыщенном паре и оснащены сепараторами-пароперегревателями СПП-220М, СПП-1000 и СПП-500-1. СПП предназначены для осушки и перегрева влажного пара, поступающего из цилиндра высокого давления (ЦВД) в цилиндр низкого давления (ЦНД) турбины, с целью снижения вероятности эрозийного износа в проточной части ЦНД и повышения надежности ее работы, а также повышения тепловой экономичности турбины. Проектная влажность пара после осушки в сепараторе СПП должна быть не более 1%*, однако в эксплуатации она превышает этот уровень [1, 2], что сказывается на эффективности и надежности турбин.

Аппараты СПП-220М, СПП-1000 и СПП-500-1 были разработаны Подольским машиностроительным заводом (ЗиО) в 70-х годах прошлого столетия, и сегодня

они требуют замены либо модернизации в связи с пониженной надежностью и истечением проектного срока эксплуатации.

Конструкция этих СПП унифицирована и представляет собой аппарат вертикального типа, в верхней части которого расположен жалюзийный сепаратор, а в нижней — двухступенчатый пароперегреватель с вертикальной ориентацией пароперегревательных кассет. Аппараты различаются габаритными размерами корпуса, а также количеством и размерами сепарационных блоков и пароперегревательных кассет. Сепаратор СПП-220М состоит из 16 блоков, а СПП-1000 и СПП-500-1 — из 20. Пароперегреватель СПП-500-1 выполнен из гладких труб из стали 08Х18Н10Т, а пароперегреватели СПП-220М и СПП-1000 — из оребренных труб из стали 20* [2].

Общие виды СПП-220М и СПП-1000 приведены на рисунке 1.

К основным достоинствам этих СПП можно отнести их унификацию и модульный принцип, суть которого заключается в возможности отключать отдельные элементы (сепарационные блоки и пароперегревательные кассеты) без остановки турбины. Аппараты снабжены

* РТМ 108.020.107-84. Сепараторы-пароперегреватели турбин АЭС. Расчет и проектирование.

ИНФОРМАЦИЯ

Разработка сети компьютерных тренажерных классов в Казанском государственном энергетическом университете

На кафедре тепловых электрических станций (ТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ) создана сеть компьютерных тренажерных классов и накоплен значительный опыт их использования в учебном процессе. Одним из самых востребованных является компьютерный тренажерно-аналитический комплекс энергоблоков ПГУ-450, ПГУ-410, ТЭС с поперечными связями.

Все тренажеры разработаны специализированной фирмой АО «Тренажеры электрических станций и сетей» — АО «ТЭСТ» (www.testenergo.ru)

В университете они используются для проведения теоретических, лабораторных и практических занятий со студентами, обучающимися по направлениям бакалавриата и магистратуры по специальностям «Теплоэнергетика и теплотехника», «Электроэнергетика и электротехника», по образовательным программам «Тепловые электрические станции», «Электрические станции», «Энергетика жилищно-коммунального хозяйства», «Технология производства электрической и тепловой энергии», «Инновационные технологии в энергетике

жилищно-коммунального хозяйства», «Электроустановки электрических станций и подстанций».

Занятия на тренажерах предусматривают выполнение обучающимися нескольких групп заданий. В первую из них входят задания, связанные с подготовкой к пуску и пуску отдельных агрегатов, систем и энергоблоков в целом. Во вторую группу — задания по останову оборудования и блока ПГУ-450.

Коллективом сотрудников кафедры ТЭС под руководством директора института теплоэнергетики, зав. кафедрой ТЭС КГЭУ, д.х.н., проф. Н. Д. Чичировой разработаны практикумы по тренажерам ПГУ-450, ПГУ-410 и учебное пособие по тренажеру ТЭС с поперечными связями. Они включают в себя теоретический материал, техническое описание компьютерного тренажера и перечень занятий, проводимых на базе одного из классов компьютерных тренажеров кафедры.

Компьютерные тренажерно-аналитические комплексы могут быть использованы для переподготовки и повышения квалификации работников энергетической отрасли.



На фото: обложки учебной литературы по работе с тренажерно-аналитическими комплексами.



Редакционная коллегия научно-технического журнала «Надежность и безопасность энергетики»
глубоко скорбит в связи со смертью профессора, доктора технических наук Виктора Васильевича Кудрявого

Виктор Васильевич Кудрявый родился 4 октября 1937 года в городе Струнино Владимирской области. После окончания в 1961 г. Ивановского энергетического института работал в энергосистеме «Красноярскэнерго», а с 1967 г. по 1989 г. в системе «Мосэнерго». В этот период в своей производственной деятельности он прошел путь от помощника машиниста на Красноярской ТЭЦ до главного инженера «Мосэнерго» — крупнейшей энергосистемы, которая снабжает тепло и электроэнергией г. Москву, Московскую область и еще ряд других городов и областей.

В 1987 г. Виктор Васильевич закончил Государственный университет управления и в 1989 г. был направлен в Министерство энергетики и электрификации СССР на должность руководителя Главного технического управления.

После распада СССР до 1996 г. работал главным инженером ОАО «РАО ЕЭС России», а затем до 2004 г. — заместителем министра топлива и энергетики РФ. В это же время (1994–1998 гг.) был Председателем совета

директоров изолированных энергосистем Дальнего Востока.

Работу на различных должностях успешно сочетал с научной деятельностью, защитив в 1991 г. диссертацию на степень кандидата технических наук, а в 1998 г. — доктора технических наук.

Виктор Васильевич был председателем комитета по надежности, энергоэффективности и инновациям Совета директоров ПАО «РусГидро», членом комитета по инновациям при Совете директоров ПАО «Россети», советником президента компании АО «ЕВРОЦЕМЕНТ-груп»

Все постсоветские годы Виктор Васильевич постоянно выступал против проводимых в 90-е и начале 2000-х годов реформ энергосистем страны, предвидя негативные последствия этих преобразований.

Его труд отмечен Правительственными наградами: в 1958 г. награжден медалью «За освоение целинных земель», в 1970 — медалью «За доблестный труд», в 1984 г. — орденом «Трудового Красного Знамени».

Редакционная коллегия выражает глубокие соболезнования родным и близким Виктора Васильевича Кудрявого.

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.

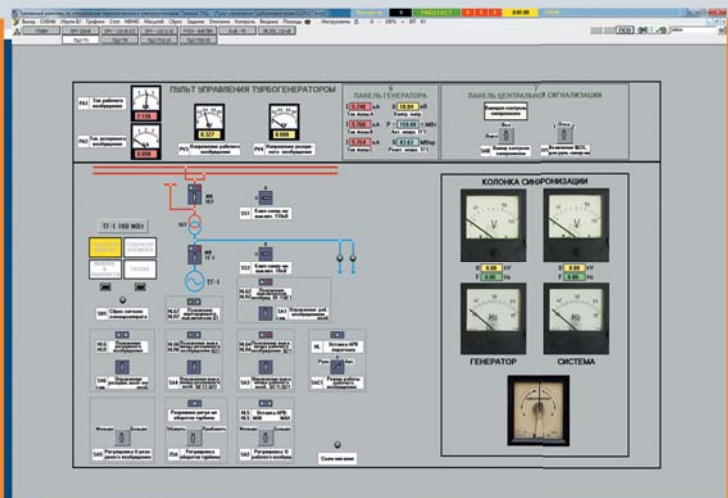
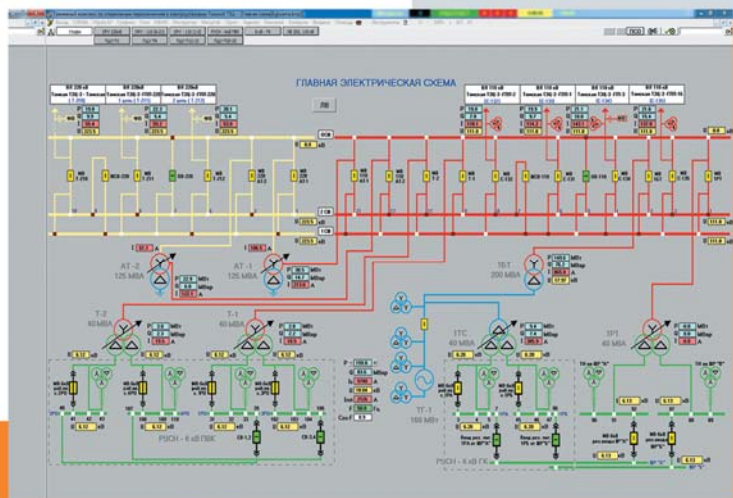


Состав главной электрической схемы станции:

- 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

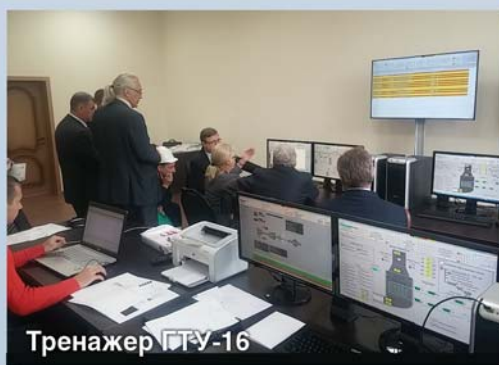
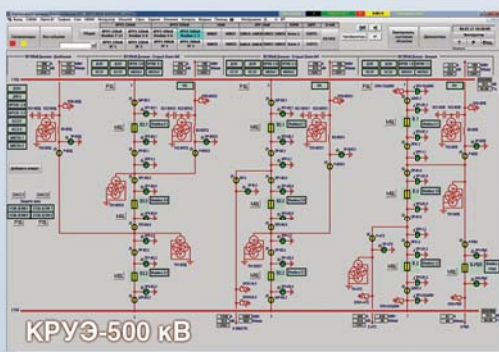


ТЭСТ

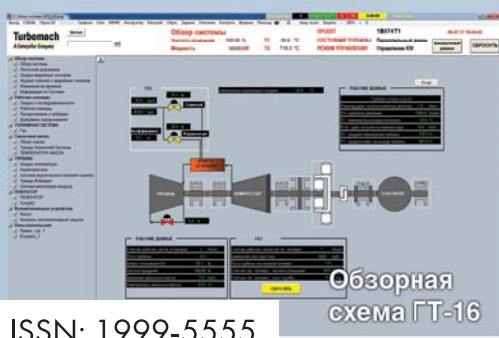
Тренажеры электрических станций и сетей



Тренажер Главной электрической схемы станции



Тренажер ГТУ-16



Обзорная схема ГТУ-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!**