НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ, ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

2021 3

Учредитель: Московский институт энергобезопасности и энергосбережения

№ 3 (99) Издается с 2005 года. Включен в Перечень ВАК

Совет учредителей:
В. М. Аванесов
В. Л. Титов
В. М. Гордиенко

Редакционная коллегия:
Главный редактор:
С. П. Зернес

Секция безопасности деятельности человека
Председатель: **П. В. Косенков**
Состав секции:
А. И. Даценко
Б. М. Степанов
А. П. Хаустов
В. И. Энговатов
И. И. Лившиц

Секция энергоресурсосбережения и энергоэффективности
Председатель: **В. М. Аванесов**
Состав секции:
Ю. Ф. Тихоненко
А. П. Щеренко
Р. З. Аминов

Секция электро- и теплоснабжения предприятий и городов
Председатель: **К. В. Капелько**
Состав секции:
В. А. Стенников
Ю. Е. Пащенко
В. В. Гудков
А. В. Крюков

Секция теории и методики обучения в энергетике
Председатель: **И. С. Растворов**
Состав секции:
А. А. Гуров
И. В. Киян
С. В. Семенов

Научный редактор:
Т. Б. Лещинская

Корректор:
Л. И. Ильина

Компьютерная верстка и дизайн:
Е. Е. Можжухина

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия.

Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС 77—28742 от 05 июля 2007г.

ISSN 2071-2219

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА

А. Н. Шилин, А. А. Шилин, С. С. Дементьев, Н. С. Кузнецова. Устройство бесконтактного измерения гололедной массы на проводах воздушных линий электропередачи 5

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

С. М. Карпенко, Н. В. Карпенко. Анализ и моделирование регионального электропотребления с учетом влияния внешних факторов 12

В. И. Мурко, О. П. Черникова. Повышение экологичности и эффективности городской системы теплоснабжения с использованием водоугольного топлива 18

В. Е. Юрин, Д. О. Башлыков. Прогнозный сравнительный анализ модернизации АЭС на базе комбинирования с автономным водородным энергокомплексом и газотурбинной установкой 23

А. А. Тяпин, В. И. Пантелеев, Е. С. Кинев, М. В. Первухин. Кодовое управление параметрическими моделями индукционных нагревателей 31

А. Г. Фиапшев, М. М. Хамоков, О. Х. Кильчукова, Б. Б. Темукуев, Б. А. Фиапшев. Оптимизация параметров и режимов работы биогазовой установки для достижения максимального выхода биометана 41

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ

В. О. Акуличев, В. Ю. Непомнящий, С. Г. Висич, М. В. Панарин, А. А. Маслова. Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения температуры провода воздушной линии 46

Адрес редакции:
105425, Москва,
Щелковский проезд, д. 13А
Телефон/факс: +7 (495) 652-24-07

Адрес электронной почты:
redaktor@endf.ru
Сайт: www.endf.ru

Подписано в печать 15.06.21
Формат 60× 84 1/8.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 8.
Тираж 3000 экз.
Цена договорная

Отпечатано в
ООО «Тверская фабрика печати»
г. Тверь, Беляковский пер., д. 46
Тел. (4822) 35-32-13
Заказ 5843

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЗОВАНИЯ

А. В. Хакимов. Стратегия работы с персоналом на предприятиях электроэнергетики 52

НОРМАТИВНЫЕ АКТЫ И ДОКУМЕНТЫ

Об утверждении наименований квалификаций и требований к квалификациям в электроэнергетике 56

Новое в законодательстве 70

СЕМИНАРЫ, ВЫСТАВКИ, КОНФЕРЕНЦИИ

Вода в промышленности 72

Автоматизация производства 73

За достоверность сведений в рекламных материалах ответственность несет рекламодатель.

Мнение авторов публикаций может не совпадать с позицией редакции журнала «Энергобезопасность и энергосбережение».

За точность фактов и достоверность информации ответственность несут авторы.

Без письменного разрешения редакции перепечатка материалов запрещена.

SCIENTIFIC, TECHNICAL AND ANALYTICAL JOURNAL

ENERGY-SAFETY AND ENERGY-ECONOMY

2021 3

Founder: Moscow Institute of Energy-safety and Energy-economy

№ 3 (99) Published from 2005. The journal is included in the official VAK's editions list

Founders Council:
Valery M. Avanesov
Vladimir L. Titov
Valery M. Gordienko

Editorial Board:
Editor-in-chief:
Svetlana Zernes

Life and Industrial Safety Section
Chairman: **Petr V. Kosenkov**
Members:
Anatoly I. Datsenko
Boris M. Stepanov
Aleksander P. Khaustov
Victor I. Engovatov
Ilya I. Livshitz

Energy-economy and Energy-efficiency Section
Chairman: **Valery M. Avanesov**
Members:
Yury F. Tikhonenko
Aleksander P. Scherenko
Rashid Z. Aminov

Electrical and Heat Supply of Enterprises and Cities Section
Chairman: **Konstantin V. Kapel'ko**
Members:
Valery A. Stennikov
Yulia E. Paschenko
Vladimir V. Gudkov
Andrey V. Kryukov

Theory and Methodology of Education in Energy Section
Chairman: **Igor' S. Rastvorov**
Members:
Aleksey A. Gurov
Irina V. Kiyan
Sergey V. Semenov

Science Editor:
Tamara B. Leschinskaja

Proofreader:
Larisa I. Iljina

Design:
Elena E. Mozhzhukhina

ISSN 2071-2219

CONTENTS

ENERGY-SAFETY AND OCCUPATIONAL SAFETY

A. N. Shilin, A. A. Shilin, S. S. Dementyev, N. S. Kuznetsova. Device for contactless ice buildup monitoring of overhead power line wires 5

ENERGY-ECONOMY AND ENERGY-EFFICIENCY

S. M. Karpenko, N. V. Karpenko. Analysis and modeling of regional electric power consumption subject to influence of external factors 12

V. I. Murko, O. P. Chernikova. Improvement of sustainability and efficiency of urban heating using coal-water slurry fuel 18

V. E. Yurin, D. O. Bashlykov. Predictive and comparative analysis of NPP modernization with an autonomous hydrogen power complex and gas turbine unit 23

A. A. Tyapin, V. I. Panteleev, E. S. Kinev, M. V. Pervukhin. Code control for parametric models of induction heaters 31

A. G. Fiapshev, M. M. Khamokov, O. Kh. Kilchukova, B. B. Temukuev, B. A. Fiapshev. Optimization of parameters and operation modes of a biogas plant for achieving the highest biomethane yield 41

DIAGNOSTICS AND RELIABILITY OF POWER EQUIPMENT

V. O. Akulichev, V. Yu. Nepomnyashchy, S. G. Visich, M. V. Panarin, A. A. Maslova. Mathematical model of a remote monitoring module by wire temperature of an overhead power line 46

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL PROBLEMS AND EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

A. V. Hakimov. Staff management strategies at power engineering companies 52

Editorial office:
105425, Moscow,
Schelkovskiy proezd, 13A
Phone: +7 (495) 652-24-07
Fax: +7 (495) 652-24-07

E-mail:
redaktor@endf.ru

Web site: www.endf.ru

Printed:
Tver Printing Factory LLC
46 Belyakovsky Pereulok
Tver, Russia
Phone: +7 (4822) 35-32-13
Order number 5843

ACTS AND DOCUMENTS

On job qualification titles and requirements in power engineering 56

News of legislation 70

SEMINARS, EXHIBITIONS AND CONFERENCES

Water in Industry Conference 72

Industrial Automation Conference 73

The advertisers have responsibility for the advertisements.

The authors` opinion may not always be supported by the editorial board of "Energy-safety and Energy-economy".

The authors have responsibility for the accuracy of articles` content.

The reproduction without written permission of the editorial board is forbidden.

УДК 621.315.175 DOI 10.18635/2071-2219-2021-3-5-11

Устройство бесконтактного измерения гололедной массы на проводах воздушных линий электропередачи

А. Н. Шилин,
Волгоградский государственный технический университет,
заведующий кафедрой «Электротехника», доктор технических наук, профессор

А. А. Шилин,
Волгоградский государственный технический университет,
доцент кафедры «Электротехника», кандидат технических наук

С. С. Дементьев,
Волгоградский государственный технический университет,
преподаватель кафедры «Электротехника», кандидат технических наук

Н. С. Кузнецова,
Волгоградский государственный технический университет,
доцент кафедры «Электротехника», кандидат технических наук

В статье обосновывается важность мониторинга гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи. Указываются недостатки существующих систем телеметрии гололедных нагрузок на основе тензодатчиков и предлагается устройство бесконтактного измерения гололедной массы на проводах посредством видеорегистрации габарита линии. Рассматривается алгоритм видеораспознавания низшей точки провисания провода. Анализируется возможность косвенного измерения температуры провода, покрытого отложениями различного вида, без применения контактного датчика. Описывается процедура определения типа формирующихся отложений путем сравнения текущих значений точек росы и десублимации.

Ключевые слова: *воздушные линии электропередачи, мониторинг гололедообразования, smart grid, видеоизмерения, бесконтактные измерения.*

Проблема высокой аварийности воздушных линий электропередачи остается актуальной из-за формирования гололедных отложений на проводах. На долю неисправностей, связанных с гололедообразованием, приходится более 50 % от общего количества аварий на ВЛ, при этом продолжительность аварийных отключений и обусловленный этим недоотпуск электроэнергии составляют, как правило, свыше 60 % от годовых значений [1]. Климатические условия эксплуатации воздушных линий, в первую очередь оледенение, оказывают исключительное влияние на безопасность эксплуатации и надежность всей системы электроснабжения, что особенно важно в процессе формирования умных сетей нового поколения (smart grid). Технология умной электрической сети подразумевает ее практически полную безотказность за счет гибкого перестроения конфигурации и изменения параметров функционирования, адаптивного условиям внешней среды [2]. Это достигается посредством организации широчайшего информационного обмена в рамках одной сети, иными словами, совмещения силовой и информационной сетей в единую энергоинформационную систему. Становится очевидным, что на пути эволюции электрической сети до уровня smart grid необходимо в том числе внедрение высокоточных устройств автоматического мониторинга гололедообразования.

Визуальное обнаружение гололедных отложений, выполняемое силами выездных бригад персонала сетевых предприятий, в настоящее время остается основным способом диагностики оледенения линий. Во многом это объясняется низкими эксплуатационными качествами устройств непосредственного взвешивания гололеда на проводах – системами телеметрии гололедных нагрузок (СТГН) на тензодатчиках. Монтаж измерительных постов СТГН требует значительной реконструкции воздушной линии на ее отдельных участках, а именно встраивания датчиков веса провода между траверсой и гирляндой изоляторов.

Возможность более простого монтажа и высокие метрологические характеристики отличают предложенный ранее оптический метод диагностики [3]. Согласно данному методу (рис. 1), деформация провода оценивается по величине габарита (Г) до земли, для чего на самом проводе (рис. 2) монтируются оптическая метка 1 и датчик температуры 2, при этом положение провода с высокой точностью фиксируется камерой видеонаблюдения 3, закрепленной на

стойке опоры ВЛ. Устанавливаемая также на опоре метеостанция 4 служит для определения параметров ветрового давления на провода, температуры окружающей среды, влажности и давления воздуха, а центральным элементом устройства служит компьютерный блок обработки и передачи информации 5, оснащенный беспроводными интерфейсами связи как с датчиком 2 (например, посредством Bluetooth- или ZigBee-канала), так и с удаленным центром мониторинга (путем организации WiFi-мостов).

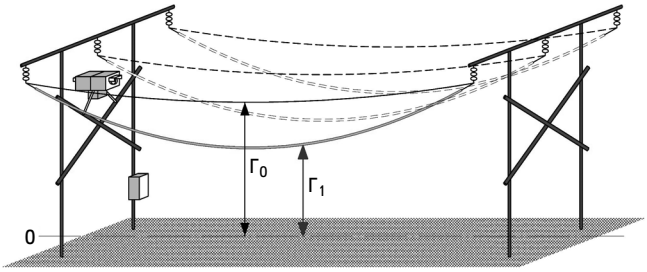


Рис. 1. Изменение положения провода при его растяжении гололедной массой

Fig. 1. Ice buildup sag in wires

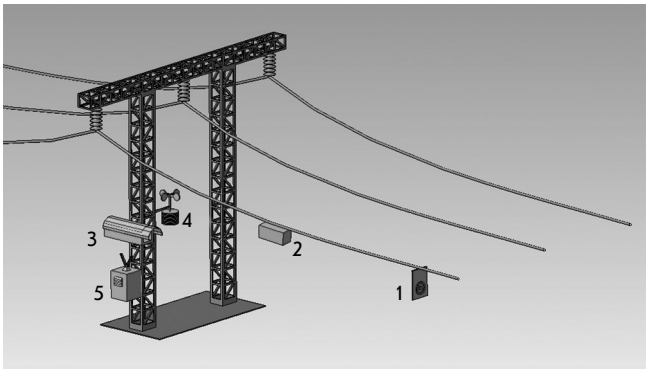


Рис. 2. Измерительный пост мониторинга гололедообразования по провисанию провода

Fig. 2. Wire sag measurement post for ice buildup monitoring

Несмотря на преимущества размещения элементов измерительного поста по сравнению с тензометрическими датчиками, необходимость монтажа датчика температуры и оптической метки непосредственно на высоковольтном проводе ВЛ требует отключения линии или организации работ под напряжением как при монтаже, так и дальнейшем обслуживании системы в ходе ее эксплуатации.

Рассмотрим возможность диагностики оледенения по провисанию провода с реализацией исключительно бесконтактных измерений. В этом случае конструкция измерительного поста (рис. 3) будет аналогична изображенной на рис. 2 за исключением того, что видеокамерой 1 фиксируется низшая точка провисания провода, свободного от крепления каких-либо элементов, при этом наряду с метеостанцией 2 на опоре также располагается датчик магнитного поля 3. Таким образом, вкупе с компонентами 1, 2, 3, соединенными с блоком обработки и передачи информации 4, все элементы поста монтируются лишь на опоре ВЛ. Отличиями данной модификации метода от описываемой ранее являются распознавание низшей точки провисания провода, не оснащенного оптической меткой, а также расчет механической нагрузки без непосредственного измерения температуры провода.

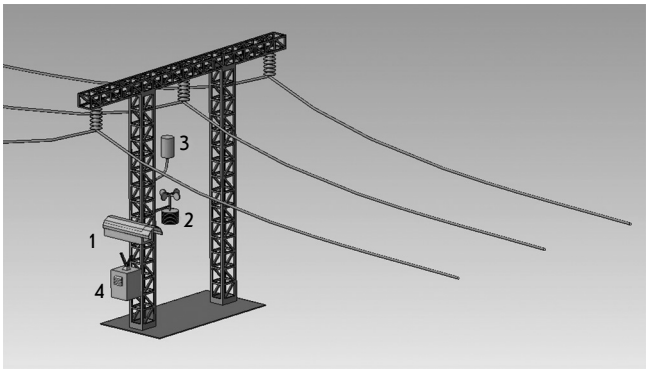


Рис. 3. Размещение элементов поста бесконтактных измерений

Fig. 3. Contactless measurement post elements

Распознавание низшей точки провисания подразумевает анализ содержимого видеокадра с целью поиска на нем изображения провода, а именно выделения участков с наборами точек, координаты которых задаются уравнением непрерывной линии. Эта процедура может включать в себя следующую последовательность действий:

1. Приведение исходного изображения (видеокадра) к бинарному виду, то есть состоящему из точек только двух цветов – цвета фона и цвета объектов.
2. Очистка от шума.
3. Выделение связных областей – наборов точек на изображении, в котором любые две точки соединены друг с другом через последовательность соседей.
4. Удаление случайных областей и выявление искомой непрерывной связной области (линии провисающего провода) для нахождения точки экстремума.

Расчет механической нагрузки без измерения температуры провода требует оценки влияния различных видов отложений (гололеда, а также снежно-изморозевой смеси), покрывающих провод, на его температурное поле. Выполним расчет температуры провода в предположении об отсутствии отложений с учетом величины протекающего по линии тока, температуры окружающей среды, а также условий обдува провода – скорости и направления ветра.

Контроль за изменением магнитного поля ВЛ позволяет определять протекающий по линии ток без контакта с проводами [4–6]. В настоящее время этот метод используется при функционировании устанавливаемых на опорах ЛЭП индикаторов коротких замыканий LineTroll 3100, ИКЗ-1 и др., что свидетельствует о возможности выполнения датчика магнитного поля на базе ферромагнитных сердечников с обмотками аналогично перечисленным устройствам.

При этом, как следует из [7], фазный ток, например, для линии, выполненной на опорах с горизонтальным расположением проводов, находится следующим образом:

$$I=\frac{2\pi H_y}{\frac{\sqrt{3}H_x}{x}\left(\frac{1}{H_y}-\frac{\sqrt{3}H_x}{x\left(H_y^2+3H_x^2\right)}\right)},$$

где H_x, H_y – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля, А/м;
x – расстояние между фазными проводами, м.

Тогда выделяемый при протекании электрического тока тепловой поток q, Вт/м^2, через поверхность провода длиной 1 м составит:

$$q=\frac{I^2R}{S},$$

а объемная плотность тепловыделения Q, Вт/м^3:

$$Q=\frac{I^2R}{V},$$

где R – активное сопротивление провода, Ом;
S, V – площадь поверхности теплообмена (м^2) и объем рассматриваемого участка провода, м^3, соответственно, вычисляемые исходя из предположения о цилиндрической форме провода:

$$S=\pi\cdot d_{\text{пр.э}}\cdot 10^{-3};$$

$$V=\frac{\pi}{4}d_{\text{пр.э}}^2\cdot 10^{-6},$$

где $d_{\text{пр.э}}$ – эквивалентный диаметр провода, учитывающий увеличение поверхности теплообмена за счет витой структуры сталеалюминевого провода, мм.

Для расчета данной величины используется соотношение из [8]:

$$d_{\text{пр.э}}=n_{\text{пров}}d_{\text{пров}}\left(1-\frac{2\arcsin\sqrt{1-0,25\left(\frac{d_{\text{пров}}}{d_{\text{пр}}-d_{\text{пров}}}\right)^2}}{360}\right),$$

где $n_{\text{пров}}$ – число проволок в наружном повиве провода;
$d_{\text{пров}}$, $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки и провода соответственно, мм.

В случае оледенелой или снежно-изморозевой поверхности проводника его теплообмену с окружающей средой предшествует теплопроводность в отложениях. Процесс переноса теплоты между поверхностью провода и воздухом является результатом т. н. сложного теплообмена, а именно совокупного действия конвективного теплообмена и теплового излучения [9, 10].

Основной количественной характеристикой сложного теплообмена является коэффициент теплоотдачи α, Вт/(м^2·°С) [8]:

$$\alpha=\alpha_{\text{к}}+\alpha_{\text{л}},$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – учитывает действие конвекции;
$\alpha_{\text{л}}$ – действие теплового излучения.

Для провода, свободного от отложений, коэффициент теплоотдачи конвекцией может быть найден как [8]:

$$\alpha_{\text{к}}=\frac{\lambda_{\text{в}}\cdot \text{Nu}}{d_{\text{пр.э}}}10^3, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С);
Nu – критерий Нуссельта, вычисляемый для случая вынужденной конвекции по формуле [8]:

$$\text{Nu}=0,218k_{\psi}\text{Re}_{\text{э}}^{0,6},$$

где k_{ψ} – коэффициент зависимости теплоотдачи при конвективном теплообмене от угла атаки ветра $\psi_{\text{в}}$, определяемый по таблице, приводимой в [8];
$\text{Re}_{\text{э}}$ – эквивалентный критерий Рейнольдса, учитывающий совместное действие свободной и вынужденной конвекции, при наличии ветра равный [8]:

$$\text{Re}_{\text{э}}=\sqrt{\text{Re}^2+0,5\text{Gr}},$$

где Re – критерий Рейнольдса;
Gr – критерий Грасгофа.

Данные величины определяются с помощью следующих выражений [8]:

$$\text{Re}=\frac{v\cdot d_{\text{пр.э}}}{\upsilon_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где v – скорость ветра, м/с;
$\nu_{\text{в}}$ – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м^2/с;

$$\text{Gr}=\frac{g\beta_{\text{в}}d_{\text{пр.э}}^3\left(t_{\text{пр}}-t_{\text{в}}\right)}{\upsilon_{\text{в}}^2}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с^2;
$t_{\text{пр}}$ – температура поверхности провода, °С;
$t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С;
$\beta_{\text{в}}$ – температурный коэффициент объемного расширения воздуха, 1/°С, который находится как [8]:

$$\beta_{\text{в}}=\frac{1}{t_{\text{в}}+273}.$$

При этом значения параметров воздуха $\lambda_{\text{в}}$ и $\nu_{\text{в}}$ в реальном диапазоне температур с достаточной точностью могут быть представлены в виде аналитических зависимостей [8]:

$$\lambda_{\text{в}}=2,44\cdot 10^{-2}\sqrt{1+0,0069t_{\text{в}}};$$

$$\upsilon_{\text{в}}=13,28\cdot 10^{-6}\left(1+0,0069t_{\text{в}}\right).$$

Коэффициент теплоотдачи излучением [8]:

$$\alpha_л = \frac{5,67\varepsilon_и}{t_{пр} - t_в}\left[\left(\frac{273+t_{пр}}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+t_в}{100}\right)^4\right], \qquad (4)$$

где $\varepsilon_и$ – постоянная излучения, принимаемая равной 0,6 для проводов, не покрытых отложениями и находящихся в эксплуатации более двух лет.

С использованием метода конечных элементов, реализованного в среде ELCUT, выполнен расчет температурного поля провода, свободного от отложений, а также покрытого ледяной и снежно-изморозевой оболочкой цилиндрической формы толщиной b, мм, при этом наличие отложений требует учитывать утолщение проводника на $2b$ в (1), (3), а при вычислении коэффициента теплоотдачи излучением по формуле (4) увеличение $\varepsilon_и$ до 0,97 для оледенелой поверхности проводника и 0,80 для снежно-изморозевой. В силу наличия в (3) и (4) величины $t_{пр}$ расчет температурного поля провода будем осуществлять итерационно.

В качестве примера зададим следующие исходные параметры: провод АС-150/24, III район по гололеду, II район по ветру, длина пролета линии 240 м, температура воздуха: −30 °С, ток нагрузки: 150 А, скорость и угол атаки ветра: 5 м/с и 90° соответственно. Результаты расчета приведены в табл. 1. Как видно из полученных данных, утолщение ледяной оболочки вплоть до 50 мм практически не приводит к изменению температуры провода, в то время как нарастание снежно-изморозевых отложений способствует нагреву провода на 4,06 °С. Это объясняется меньшей более чем в 4,8 раз теплопроводностью снега и изморози (0,465 Вт/(м·°С) для снежно-изморозевой смеси и 2,25 Вт/(м·°С) для льда), что приводит к ухудшению условий охлаждения провода и его нагреву.

Используя стандартную методику расчета, основанную на решении уравнения состояния провода (изложенную, например, в [11]), вычислим механическое напряжение σ, Н/мм^2, в материале провода и дадим оценку погрешности δσ, возникающей в связи с тем, что при отсутствии датчика температуры видеокамерой 1 фиксируется истинное значение провисания провода $f_{г\text{-}в}$, однако при расчете σ используется вычисленное значение температуры провода в предположении об отсутствии отложений.

Из приведенных в табл. 2 результатов следует, что, осуществляя бесконтактное измерение протекающего по линии тока (при помощи датчика магнитного поля), а также метеопараметров (посредством метеостанции), выполняя расчет температуры провода в предположении об отсутствии отложений и вводя поправку на погрешность в 20 %, возможно выполнить корректное вычисление механического напряжения без использования накладного датчика температуры провода.

Заметим, что принятое допущение о цилиндрической форме отложений более всего характерно для тяжелых условий гололедообразования: так, при формировании отложений несимметричной формы создаваемый крутящий момент вращает провод, что приводит с течением времени к более равномерному нарастанию отложений по всей его поверхности и приближению формы отложений к цилиндрической [12]. Тем не менее оценим достоверность предлагаемой методики, выполнив расчет температуры провода, покрытого отложениями несимметричной формы. С этой целью приведем формулы (1) – (3)

Таблица 1
Table 1

Нагрев провода в различных условиях гололедообразования
Wire heat up under various ice-forming conditions

Толщина оболочки отложений, мм	Температура провода, °С	
	Лед	Снег и изморозь
0	−27,14	
5	−27,52	−26,35
10	−27,69	−25,71
15	−27,77	−25,19
20	−27,81	−24,75
25	−27,83	−24,38
30	−27,84	−24,06
35	−27,84	−23,76
40	−27,83	−23,54
45	−27,82	−23,31
50	−27,81	−23,08

Таблица 2
Table 2

Характеристика погрешности расчета механического напряжения, вызванной неучетом снежно-изморозевых отложений при оценке температуры провода

Characteristics of a tension calculation error caused by ignoring snow and ice buildups for wire temperature estimation

Толщина оболочки отложений, мм	Погрешность расчета механического напряжения, %
5	19,90
10	20,67
15	21,26
20	21,73
25	22,09
30	22,35
35	22,58
40	22,67
45	22,76
50	22,83

к более общему виду, а именно, оперируя величиной гидравлического диаметра $D_г$ [13]:

$$D_г = \frac{4A}{P},$$

где A – площадь поперечного сечения потока жидкости/газа;

P – «смоченный» периметр поперечного сечения потока.

Очевидно, что записанные для частного случая (с учетом цилиндрической формы тела) выражения (1) – (3) предполагают равенство $D_г = d_{пр.э} \cdot (D_г = d_{пр.э} + 2b)$.

Результаты вычислений свидетельствуют о том, что при наличии несимметричных гололедных отложений температура провода достигает значения −27,76 °С, эквивалентной цилиндрической формы (толщиной 32,02 мм): −27,84 °С, а при полном отсутствии отложений (табл. 1): −27,14 °С. Полученная разница величиной менее 1 °С доказывает целесообразность косвенного расчета температуры провода без учета гололедной муфты.

Температура провода, покрытого снежно-изморозевыми отложениями той же несимметричной формы, составляет −25,11 °С, что практически соответствует значению, полученному для цилиндрической оболочки толщиной 15 мм (табл. 1), что подтверждает необходимость коррекции 20 % погрешности при вычислении механического напряжения в предположении об отсутствии отложений.

С учетом всего вышесказанного следует, что необходимость введения 20 % поправки зависит от типа отложений, а именно требуется лишь при наличии снежно-изморозевых оболочек.

Надежное определение вида формирующихся отложений выполняется с помощью термодинамического метода, согласно которому одновременно измеряют температуру и относительную влажность воздуха вблизи провода, а также температуру его поверхности [14]. Полученные данные используются для расчета точки росы t_a (°С) [14]:

$$t_a = \frac{243{,}12\left(\ln(RH) + \frac{17{,}62 t_в}{243{,}12 + t_в}\right)}{17{,}62 - \left(\ln(RH) + \frac{17{,}62 t_в}{243{,}12 + t_в}\right)}$$

и точки десублимации t_i, °С [14]:

$$t_i = \frac{272{,}16\left(\ln(RH) + \frac{22{,}46 t_в}{272{,}62 + t_в}\right)}{22{,}46 - \left(\ln(RH) + \frac{22{,}46 t_в}{272{,}62 + t_в}\right)},$$

где RH – относительная влажность воздуха.

После этого значения t_a и t_i сравниваются с температурой поверхности провода $t_{пр}$. Анализ соотношения этих величин между собой позволяет однозначно диагностировать формирование ледяных, снежно-изморозевых или сложных отложений [14]:

– если температура поверхности провода больше точки десублимации, но меньше либо равна точке росы, то принимается решение об образовании гололедных отложений;

– если температура поверхности провода больше точки росы, но меньше либо равна точке десублимации, то принимается решение об образовании изморозевых отложений;

– если температура поверхности провода меньше точки росы и точки десублимации, то принимается решение об образовании сложных отложений.

В момент начала нарастания снежно-изморозевой муфты действительная температура поверхности провода отличается не более чем на 1–2 °С (табл. 1) от значения, вычисленного в предположении об отсутствии отложений. Данное отклонение сравнимо с погрешностью датчиков температуры,

что свидетельствует о возможности распознавания нарастания снега и изморози термодинамическим методом без применения контактных (накладных) датчиков, определяя температуру провода расчетным путем, а влажность и температуру воздуха при помощи метеостанции.

Таким образом, в качестве метеостанции должна использоваться автоматическая метеостанция, позволяющая регистрировать скорость и направление ветра, влажность и температуру окружающей среды, а также передавать измеренные данные, используя стандартные интерфейсы связи, например RS-232 или RS-485. Найденные значения провисания провода и механического напряжения в его материале позволяют рассчитать удельный вес отложений, а также эквивалентную толщину стенки гололедной муфты, что позволит определить оптимальные параметры плавки гололеда на линии и предотвратить возникновение аварии.

Литература

1. Башкевич В. Я., Угаров Г. Г., Кузнецов П. А., Стебеньков С. Б. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях. – Саратов: СГТУ, 2013. – 244 с.
2. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: Энергия, 2010. – 208 с.
3. Шилин А. Н., Шилин А. А., Дементьев С. С. Система контроля гололедных нагрузок на провода воздушных линий электропередачи: патент РФ № 2658344.
4. Huang, Q., Zhen, W., Pong, P. W. T. (2014). A novel approach for fault location of overhead transmission line with noncontact magnetic-field measurement. *IEEE Transactions on Power Delivery, 27*(3), 1186–1195. https://doi.org/10.1109/tpwrd.2012.2190427.
5. Sun, X., Huang, Q., Hou, Y., Jiang, L., Pong P. W. T. (2013). Non-contact operation-state monitoring technology based on magnetic field sensing for overhead high-voltage transmission line. *IEEE Transactions on Power Delivery, 28*(4), 2145–2153. https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2264102.
6. Tian, S., et al. (2016). A new magnetic field measurement based method to detect faulty line and fault location for single phase to ground fault occurred in distribution network. *Power System Protection and Control*, 44, 61–67.
7. Olsen, R. G., et al. (1988). Magnetic fields from electric power lines: theory and comparison to measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery, 59*(3), 2127–2136. https://doi.org/10.1109/61.194025.
8. СТО 56947007-29.240.55.143–2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий.
9. Morgan, V. T. (1991). *Thermal behaviour of electrical conductors: steady, dynamic, and fault-current ratings. New York,* Research Studies Press.
10. Seppa, T. O. (1995). Accurate ampacity determination: temperature-sag model for operational real time ratings. *IEEE Transactions on Power Delivery, 10*(3), 1460–1470. https://doi.org/10.1109/61.400930.
11. Глазунов А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. – Т. 1. Работа и расчет проводов и тросов. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
12. Левченко И. И., Засыпкин А. С., Аллилуев А. А., Сацук Е. И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах. – М.: МЭИ, 2007. – 448 с.
13. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
14. Титов Д. Е., Петренко С. А., Угаров Г. Г. Способ обнаружения гололедных, изморозевых и сложных отложений на проводе и устройство для его осуществления: патент РФ № 2554718.

Для цитирования:

Шилин А. Н., Шилин А. А., Дементьев С. С., Кузнецова Н. С. Устройство бесконтактного измерения гололедной массы на проводах воздушных линий электропередачи / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 5–11. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-5-11.

Cite this paper:

Shilin, A. N., Shilin, A. A., Dementyev, S. S., Kuznetsova, N. S. (2021). Device for contactless ice buildup monitoring of overhead power line wires. *Energy Safety and Energy Economy*, 3, 5–11 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-5-11.

Device for contactless ice buildup monitoring of overhead power line wires

A. N. Shilin,
Volgograd State Technical University, Russia, Doctor of Science, professor

A. A. Shilin,
Volgograd State Technical University, Russia, PhD

S. S. Dementyev,
Volgograd State Technical University, Russia, PhD

N. S. Kuznetsova,
Volgograd State Technical University, Russia, PhD

Ice buildup monitoring is essential to prevent wire breakage on overhead power lines. Conventional telemetry systems which are based on load cell sensors have some drawbacks as reflected in this paper. We suggest an innovative device for contactless ice buildup monitoring of overhead power line wires video recording the power line clearance. A specific algorithm for detecting the lowest point of wire sag has been provided. Also, we analyze a possibility of indirect contact sensor-free measurements of a wire temperature when the wire is being covered by icy deposits. A specific buildup type can be determined comparing a dew point and desublimation point as shown in this paper.

Keywords: *overhead power lines, ice buildup monitoring, smart grid, video measurements, contactless measurements.*

References

1. Bashkevich, V. Ya., et al (2013). *Monitoring vozdushnykh liniy elektroperedachi, ekspluatiruemykh v ekstremalnykh meteousloviyakh* [Monitoring of overhead power lines operating under extreme weather conditions]. Saratov State Technical University.

2. Kobets, B. B., Volkova, I. O. (2010). *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [Innovative development of the electric power industry based on the Smart Grid concept]. Moscow, Energia.

3. Shilin, A. N., Shilin, A. A., Dementyev, S. S. Sistema kontrolya gololednykh nagruzok na provoda vozdushnykh liniy elektroperedachi [Ice buildup monitoring system for overhead power line wires]. Russian patent #2658344.

4. Qi Huang, Wei Zhen, P. W. T. Pong. (2014). A novel approach for fault location of overhead transmission line with noncontact magnetic-field measurement. *IEEE Transactions on power delivery*, 27(3), 1186–1195. https://doi.org/10.1109/tpwrd.2012.2190427.

5. X. Sun, Q. Huang, Y. Hou, L. Jiang, P. W. T. Pong. (2013). Non-contact operation-state monitoring technology based on magnetic field sensing for overhead high-voltage transmission line. *IEEE Transactions on power delivery*, 28(4), 2145–2153. https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2264102.

6. Tian, S., et al. (2016). A new magnetic field measurement based method to detect faulty line and fault location for single phase to ground fault occurred in distribution network. *Power System Protection and Control*, 44, 61–67.

7. Olsen, R. G., et al. (1988). Magnetic fields from electric power lines: theory and comparison to measurements. *IEEE Transactions on power delivery*, 59(3), 2127–2136. https://doi.org/10.1109/61.194025.

8. STO 56947007-29.240.55.143–2013. Metodika rascheta predelnykh tokovykh nagruzok po usloviyam sokhraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopustimykh gabaritov vozdushnykh liniy [Computation methodology for current load limits for keeping wire mechanical strength and allowable clearance of overhead power lines]. Introduced on Feb. 13, 2013. http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.240.55.143-2013.pdf.

9. Morgan, V. T. (1991). *Thermal behaviour of electrical conductors: steady, dynamic, and fault-current ratings*. New York, Research Studies Press.

10. Seppa, T. O. (1995). Accurate ampacity determination: temperature-sag model for operational real time ratings. *IEEE Transactions on power delivery*, 10(3), 1460–1470. https://doi.org/10.1109/61.400930.

11. Glazunov, A. A. (1956). *Osnovy mekhanicheskoy chasti vozdushnykh liniy elektroperedachi. Rabota i raschet provodov i trosov* [Fundamentals of mechanical part of overhead power lines. Operation and calculation of wires and cables]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat.

12. Levchenko, I. I., et al. (2007). *Diagnostika, rekonstruktsia i ekspluatatsia vozdushnykh liniy elektroperedachi v gololednykh rayonakh* [Diagnostics, renovation, and operation of overhead power lines under icy conditions]. Moscow, MPEI.

13. Mikheev, M. A., Mikheeva, I. M. (1977). *Osnovy teploperedachi* [Heat transfer fundamentals]. Moscow, Energia.

14. Titov, D. E., Petrenko, S. A., Ugarov, G. G. Sposob obnaruzhenia gololednykh, izmorozevykh i slozhnykh otlozheniy na provode i ustroystvo dlya ego osuschestvlenia [Method for detecting ice, frost, and complex buildups on wires and a device for its implementation]. Russian patent #2554718.

УДК 658.26 DOI 10.18635/2071-2219-2021-3-12-17

Анализ и моделирование регионального электропотребления с учетом влияния внешних факторов

С. М. Карпенко,
НИТУ «МИСиС», Московский институт энергобезопасности и энергосбережения, кандидат технических наук, доцент

Н. В. Карпенко,
Российский университет транспорта (МИИТ), кандидат технических наук, доцент

Для моделирования электропотребления с учетом влияния различных факторов применяются эконометрические методы на основе анализа временных рядов, а также методы корреляционно-регрессионного анализа. В статье приведены результаты моделирования потребления электроэнергии в столичном регионе с учетом экономических и погодных факторов на основе данных за 2019–2020 гг. Построены мультипликативная прогнозная модель электропотребления региона и зависимости электропотребления от температуры воздуха и количества пасмурных дней. Результаты моделирования можно использовать при анализе и прогнозировании процессов регионального электропотребления.

Ключевые слова: *электропотребление, прогнозирование, эконометрическое моделирование, экономические факторы, погодные факторы, мультипликативная прогнозная модель.*

Вопросам анализа динамики и прогнозного моделирования электропотребления с учетом влияния различных факторов посвящено большое количество работ, в том числе [1–6]. Существенное влияние на электропотребление регионов оказывают технические, технологические, производственные, организационные, экономические и погодно-климатические показатели. Эффективным инструментом для исследований процессов электропотребления и построения прогнозных моделей необходимого качества и точности являются эконометрические методы на основе анализа временных рядов [7–10]. В настоящей статье приводятся результаты прогнозного моделирования потребления электроэнергии в столичном регионе с учетом изменившейся в 2020 г. ситуации в экономике в связи с пандемией коронавируса, а также выявлены и проанализированы взаимосвязи электропотребления и погодных факторов на основе данных за 2019–2020 гг. для Москвы.

В 2020 г. из-за введения ограничительных мер на многих предприятиях и в учреждениях в связи с пандемией коронавируса объем потребления электроэнергии в 2020 г. в Москве снизился и в среднем составил 93 % от уровня 2019 г. (рис. 1). Наименьшее снижение отмечалось в июле и августе (98 и 96 % соответственно), что связано в первую очередь с увеличением потребления электроэнергии для кондиционирования помещений. Общее падение объемов потребления электроэнергии несколько компенсировалось увеличением электропотребления бытовыми пользователями, в том числе находящимися на самоизоляции и работавшими дистанционно.

На основании месячных данных по электропотреблению Москвы 2019–2020 гг. построена мультипликативная модель электропотребления (*Electr*), имеющая нелинейный тренд:

$$Electr = \left(3,446 - 0,025 \cdot t + 0,001 \cdot t^2\right) \cdot S_t \cdot \varepsilon_t, \qquad (1)$$

где S_t – сезонные составляющие (табл. 1).

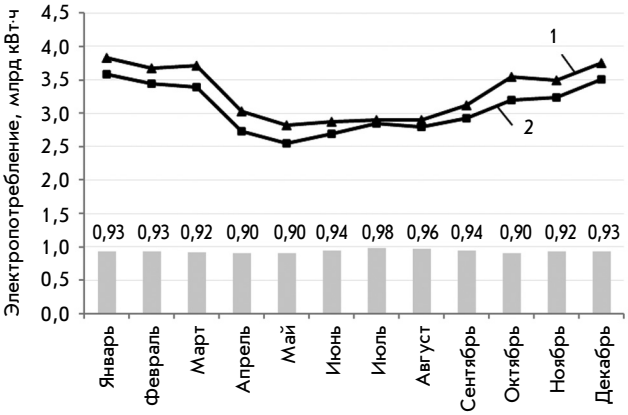


Рис. 1. Динамика потребления электроэнергии в Москве и темпы снижения электропотребления в 2020 г. по отношению к соответствующему месяцу 2019 г.:
1 – 2019 г.;
2 – 2020 г.

Fig. 1. Electric power consumption dynamics in Moscow and consumption reduction in 2020 compared to 2019:
1 – 2019;
2 – 2020

Таблица 1
Table 1

Сезонные компоненты мультипликативной модели

Seasonal components of a multiplicative model

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S_t	1,12	1,09	1,09	0,89	0,84	0,88	0,91	0,91	0,96	1,08	1,08	1,16

Средняя относительная ошибка аппроксимации MAPE = 1,12 % свидетельствует о высокой точности модели.

Модельный прогноз общей тенденции на 2021 г. при сохранении неблагополучной ситуации в экономике, сложившейся в 2020 г., показывает дальнейшее снижение объемов потребления электроэнергии (рис. 2). Данный прогноз можно отнести к разряду пессимистичных, поскольку он предполагает отсутствие позитивных сдвигов в экономике, связанных с выходом из кризисной ситуации.

Моделирование потребления электроэнергии на годовых данных показывает, что после роста объемов в 2016–2018 гг. (103 % по отношению к уровню предыдущего года) в 2019 г. объем практически не изменился (100 %). Прогноз модели показывает снижение объемов начиная с 2020 г. (рис. 3), которое распространяется также и на 2021 г.

В случае стабилизации экономики и ее дальнейшего роста к концу 2022 г. объем потребления электроэнергии должен выйти на уровень 2019 г. Рост электропотребления в 2022–2025 гг., согласно прогнозу, составит примерно 1 % в год (рис. 3). Такой прогноз можно расценивать как нейтрально-оптимистичный.

Существенное влияние на процесс электропотребления оказывают также погодно-климатические факторы, а именно температура воздуха, естественная освещенность, влажность, скорость и направление ветра и т. д. [3–6]. Они во многом определяют сезонные колебания и суточную неравномерность графиков потребления электроэнергии. Наибольшее влияние оказывают температура воздуха и естественная освещенность. Влияние температуры воздуха на электропотребление обусловлено, как правило, массовым применением различного климатиче-

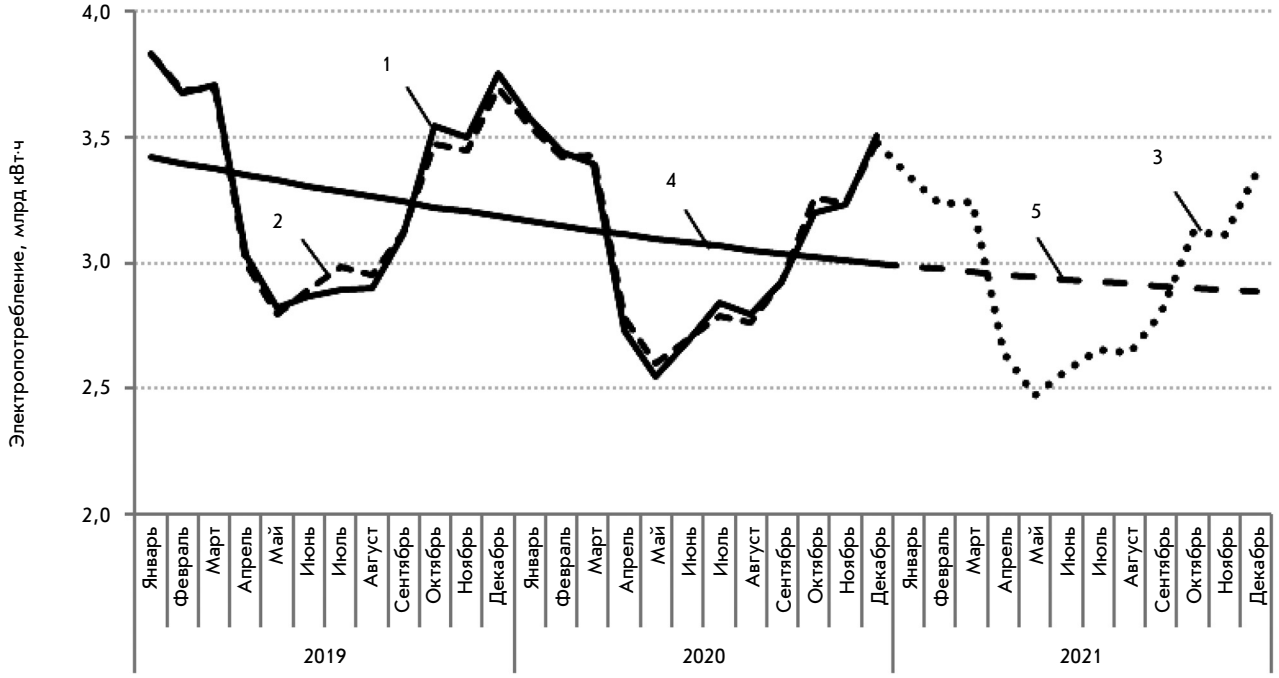


Рис. 2. Динамика и пессимистичный сценарий прогнозной модели электропотребления:
1 – фактические значения;
2 – модельные значения;
3 – прогноз;
4 – тенденция;
5 – прогноз тенденции

Fig. 2. Dynamics and a pessimistic forecast for an electric power consumption model:
1 – current values;
2 – model values;
3 – forecast;
4 – trend;
5 – trend forecast

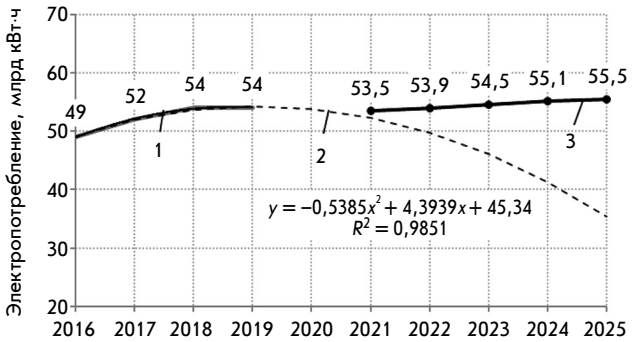


Рис. 3. Варианты прогноза потребления электроэнергии:
1 — фактические данные;
2 — пессимистичный прогноз;
3 — нейтрально-оптимистичный прогноз

Fig. 3. Forecast scenarios for electric power consumption:
1 — current data;
2 — pessimistic forecast;
3 — neutral to optimistic forecast

ского оборудования в зимний и летний периоды (электроотопительные приборы, кондиционеры, холодильные установки). Для региональных энергообъединений с потребителями жилищно-коммунального сектора, где осветительная нагрузка составляет значительную часть, колебания естественной освещенности оказывают существенное влияние на электропотребление, особенно на формирование утреннего и вечернего максимумов. При увеличении доли промышленных потребителей в регионе взаимосвязь естественной освещенности и электропотребления не так однозначна. Для повышения качества и точности прогноза необходимо оценить влияние погодных факторов на электропотребление.

Для целей настоящего исследования был произведен анализ влияния погодных факторов московского региона на объемы электропотребления. Рассмотрены месячные значения за 2019–2020 гг. следующих показателей:

среднесуточная температура – *Temp;*
средняя влажность – *Humid;*
скорость ветра – *Wind;*
ясных дней – *Clear;*
облачных дней – *Cloud;*
пасмурных дней – *Dull;*
дождь – *Rain;*
снег – *Snow.*

Корреляционный анализ подтвердил сильную взаимосвязь погодных факторов (коэффициенты парной корреляции имеют значения от 0,61 до 0,94). С целью исключения эффекта мультиколлинеарности в данных из восьми погодных факторов для моделирования выбраны две переменные: *Temp* и *Dull*, характеризующие температурные условия и освещенность и в наибольшей степени определяющие потребление электроэнергии. Из остальных факторов пять обладают тесной корреляционной взаимосвязью с факторами *Temp* и *Dull* и совместно с ними воздействуют на общий результат. На рис. 4 приведен граф корреляционных связей погодных факторов, имеющих сильную взаимосвязь.

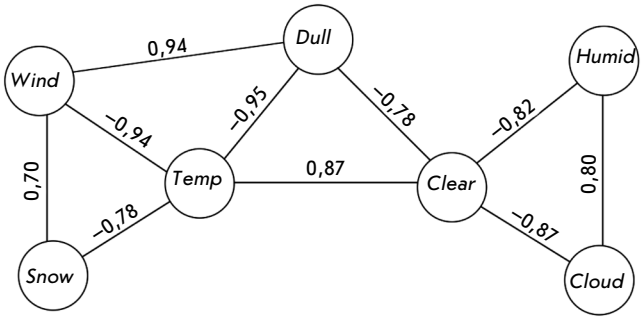


Рис. 4. Граф корреляционных связей погодных факторов

Fig. 4. Correlation graph for climate factors

Зависимость электропотребления *Electr* от среднесуточной температуры имеет вид полинома третьей степени:

$$Electr = 3,464 - 0,046 \cdot Temp - 0,002 \cdot Temp^2 + 0,0001 \cdot Temp^3, \quad (2)$$

который описывает нелинейное снижение электропотребления на обогрев с ростом внешней температуры от отрицательных до положительных значений и увеличение потребления электроэнергии на кондиционирование в условиях роста температуры окружающей среды от 18–20 °С и выше (рис. 5). Точность модели высокая (MAPE = 4,08 %). В рамках модели температурный фактор на 80,4 % объясняет формирование значений электропотребления (коэффициент детерминации R^2 составляет 0,804). В целом анализ зависимости (2) и графика, приведенного на рис. 5, подтверждает тесную взаимосвязь объемов электропотребления и температуры окружающей среды в Москве.

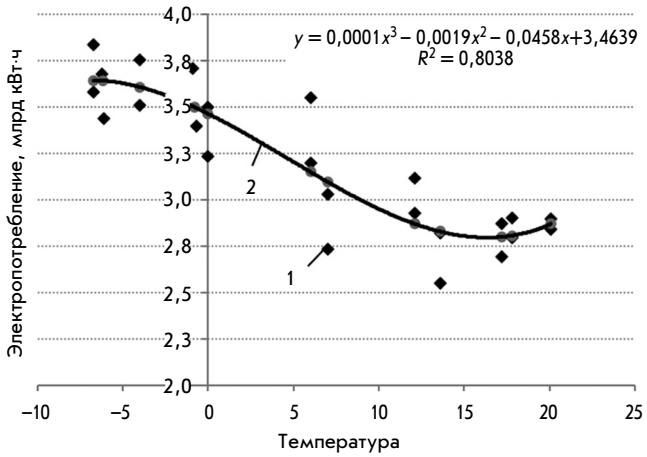


Рис. 5. Зависимость потребления электроэнергии от температуры окружающей среды:
1 — фактические значения;
2 — тенденция

Fig. 5. Correlation of electric power consumption and an air temperature:
1 — real data;
2 — trend

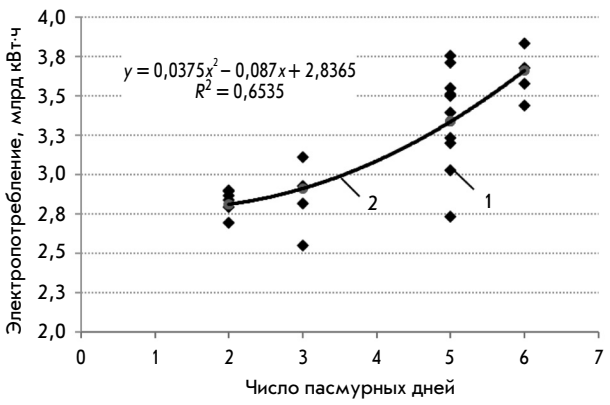


Рис. 6. Зависимость потребления электроэнергии от среднемесячного числа пасмурных дней: 1 — фактические данные; 2 — тенденция

Fig. 6. Correlation of electric power consumption and an average monthly number of cloudy days: 1 — real data; 2 — trend

Зависимость электропотребления *Electr* от освещенности также имеет нелинейный характер:

$$Electr = 2,837 - 0,087 \cdot Dull - 0,038 \cdot Dull^2. \quad (3)$$

Параболическая модель второго порядка отражает увеличение скорости роста электропотребления с ростом среднемесячного числа пасмурных дней (рис. 6).

В рамках модели фактор освещенности на 65,4 % объясняет формирование значений потребления электроэнергии (R^2 составляет 0,654). Точность модели высокая (MAPE = 5,43 %).

Поскольку в (1) и (2) коэффициенты регрессии свидетельствуют о незначительности вклада более высоких степеней переменных *Temp* и *Dull*, для описания комплексного воздействия погодных факторов на электропотребление построена модель множественной линейной регрессии (4) (R^2 – 0,778):

$$Electr = 3,879 - 0,049 \cdot Temp + 0,092 \cdot Dull. \quad (4)$$

Точность данной модели достаточно высокая (MAPE = 4,65 %).

Анализ зависимости (4) и графика, приведенного на рис. 6, говорит о наличии взаимосвязи электропотребления и среднемесячного числа пасмурных дней. Увеличению электропотребления при росте числа пасмурных дней способствует работа различных электроприемников, в ряде случаев весьма специфического направления использования, работа которых так или иначе зависит от числа пасмурных дней, например, дополнительной осветительной нагрузки из-за недостатка освещенности или насосного оборудования для мойки машин в пасмурную и дождливую погоду.

Погодно-климатические факторы при прогнозном моделировании электропотребления необходимо учитывать, основываясь на прогнозных данных Гидрометцентра и других метеорологических служб применительно ко всем этапам рынка электроэнергии: на основе долгосрочных двусторонних договоров, на сутки вперед и балансирующего. Для достижения наибольшего качества модели целесообразно учитывать погодно-климатические показатели для второго и третьего этапов рынка электроэнергии, поскольку именно для данных временных интервалов (сутки, часы) прогнозы погоды являются наиболее точными.

Результаты исследований, приведенных в данной статье, подтверждают, что внешние факторы, каковыми являются состояние экономики и погодно-климатические факторы, оказывают существенное влияние на объемы и динамику потребления электроэнергии региона и их необходимо учитывать при анализе и прогнозировании процессов электропотребления.

Литература

1. Бугаец В. А. Краткосрочное прогнозирование электропотребления энергорайонов и региона с учетом метеофакторов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Южно-Российский государственный политехнический университет, 2015.

2. Макоклюев Б. И., Павликов В. С., Владимиров А. И., Фефелова Г. И. Влияние колебаний метеорологических факторов на энергопотребление энергообъединений / / Энергетик. – 2003. – № 6. – С. 14–19.

3. Седов А. В., Надтока И. И. Системы контроля, распознавания и прогнозирования электропотребления: модели, методы, алгоритмы и средства. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 2002. – 320 с.

4. Губский С. О. Краткосрочное прогнозирование электропотребления в операционной зоне регионального диспетчерского управления с учетом фактора освещенности: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Южно-Российский государственный политехнический университет, 2012.

5. Карпенко С. М, Карпенко Н. В. Эконометрическое моделирование энергопотребления с учетом производственных факторов / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – № 1. – С. 14–17. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-1-14-17.

6. Карпенко С. М., Карпенко Н. В. Анализ динамики и прогнозирование электропотребления на основе эконометрического моделирования / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – № 2. – С. 20–25. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-2-20-25.

7. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. – Т. 2. – М.: Юнити-Дана, 2001. – 432 с.
8. Эконометрика / Под ред. И. И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 576 с.
9. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
10. Baumeister, C., Hamilton, J. D. (2015). Sign restrictions, structural vector autoregressions, and useful prior information. *Econometrica,* 83(5), 1963–1999. http://dx.doi.org/10.3982/ECTA12356.
11. Росстат. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. Код доступа: https://rosstat.gov.ru.

Для цитирования:
Карпенко С. М., Карпенко Н. В. Анализ и моделирование регионального электропотребления с учетом влияния внешних факторов / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 12–17. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-12-17.

Cite this paper:
Karpenko, S. M., Karpenko, N. V. (2021). Analysis and modeling of regional electric power consumption subject to influence of external factors. *Energy Safety and Energy Economy,* 3, 12–17 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-12-17.

Analysis and modeling of regional electric power consumption subject to influence of external factors

S. M. Karpenko,
National University of Science and Technology MISiS,
Moscow Institute of Energy Safety and Energy Economy, Russia, PhD, associate professor

N. V. Karpenko,
Russian University of Transport, PhD, associate professor

Electric power consumption along with a large variety of factors affecting it can be forecasted and modelled by using econometric forecasting methods, including time series and correlation and regression analysis. For the purpose of this research, electric power consumption in the Moscow Region, Russia, was modelled with consideration of economic and climate factors based on 2019–2020 power usage data. A multiplicative model for regional electric power consumption and correlations between electric power consumption and an air temperature as well as a total number of cloudy days a month were built. The results will be helpful for analyzing and forecasting of processes involved in power consumption.

Keywords: *power consumption, forecasting, econometric modeling, economic factors, climate factors, multiplicative model.*

References

1. Bugayets, V. A. (2015). *Kratkosrochnoe prognozirovanie elektropotrebleniya energorayonov i regiona s uchetom meteofaktorov* [Short-term forecasting of district and regional power consumption considering meteorological factors], PhD Thesis.
2. Makoklyuev, B. I., Pavlikov, V. S., Vladimirov, A. I., Fefelova, G. I. (2003). Vliyanie kolebaniy meteorologicheskikh faktorov na energopotreblenie energoobyedineniy [Affect of changing meteorological factors on energy consumption of power entities]. *Energetik*, 6, 14–19.
3. Sedov, A. V., Nadtoka, I. I. (2002). *Sistemy kontrolya, raspoznavaniya i prognozirovaniya elektropotrebleniya: Modeli, metody, algoritmy i sredstva* [Power consumption monitoring, recognition, and forecasting systems: Models, methods, algorithms, and tools]. Rostov-on-Don, Rostov University Publ.
4. Gubsky, S. O. (2012). *Kratkosrochnoe prognozirovanie elektropotrebleniya v operatsionnoy zone regionalnogo dispetcherskogo upravleniya s uchetom faktora osveschennosti* [Short-term forecasting of electric power consumption in a regional dispatch control area considering the light factor], PhD Thesis.
5. Karpenko, S. M., Karpenko, N. V. (2020). Ekonometricheskoe modelirovanie energopotrebleniya s uchetom proizvodstvennykh faktorov [Econometric modeling of energy consumption based on influence of industry factors]. *Energy Safety and Energy Economy,* 1, 14–17. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-1-14-17.

6. Karpenko, S. M., Karpenko, N. V. (2020). Analiz dinamiki i prognozirovanie elektropotrebleniya na osnove ekonometricheskogo modelirovaniya [Analysis of dynamics and power consumption forecasting based on econometric modeling]. *Energy Safety and Energy Economy,* 2, 20–25. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-2-20-25.

7. Aivazyan, S. A. (2001). *Prikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki* [Applied statistics. Fundamentals of econometrics]. Moscow, Unity-Dana.

8. Eliseeva, I. I. (Ed.). (2005). *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, Finances and Statistics.

9. Lukashin, Yu. P. (2003). *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov* [Short-term adaptive time series forecasting]. Moscow, Finances and Statistics.

10. Baumeister, C., Hamilton, J. D. (2015). Sign restrictions, structural vector autoregressions, and useful prior information. *Econometrica,* 83(5), 1963–1999. http://dx.doi.org/10.3982/ECTA12356.

11. Rosstat. Federal State Statistics Service. Available at: https://rosstat.gov.ru (accessed April 29, 2021).

УДК 658.264 DOI 10.18635/2071-2219-2021-3-18-22

Повышение экологичности и эффективности городской системы теплоснабжения с использованием водоугольного топлива

В. И. Мурко,
Сибирский государственный индустриальный университет, доктор технических наук, профессор

О. П. Черникова,
Сибирский государственный индустриальный университет, кандидат экономических наук, доцент

С целью решения проблем системы теплоснабжения на примере Ленинск-Кузнецкого городского округа предлагается проект генерации тепла Беловской ГРЭС, который позволит отказаться от строительства новых котельных взамен малоэффективных действующих. В рамках реализации данного проекта предлагается использовать частичное, совместное с основным пылеугольным топливом сжигание водоугольного топлива. Такое техническое решение позволит получить значительный экономический эффект и повысить экологическую безопасность ГРЭС, при этом не повлияет на тепловой баланс котельных агрегатов и не потребует их реконструкции. Суммарный экономический эффект от реализации предлагаемого проекта составит более 1,1 млрд руб. в год.

Ключевые слова: *энергоэффективность, уголь, водоугольное топливо, отходы подготовки угля.*

Одним из основных стратегических трендов мировой системы хозяйствования является обеспечение существенного снижения техногенной нагрузки на окружающую среду с ее сохранением в благоприятном для жизнедеятельности человека состоянии [1–4]. Проблемы экологической составляющей устойчивого развития отраслей и комплексов на протяжении длительного времени находятся в фокусе внимания исследователей [5–12]. В частности, ищутся пути повышения технической, экологической и экономической эффективности использования угля. На местном уровне для обеспечения теплом коммунальных и промышленных потребностей используются котельные с неэффективным слоевым сжиганием угля, которые зачастую практически полностью выработали свой ресурс. Эффективно использовать энергетическую ценность угля с учетом роста доли возобновляемых источников в мировом энергобалансе и развитие водородной энергетики, а также инфраструктурных и логистических ограничений развития угольной отрасли в условиях пандемии, смогут только технологии комплексной переработки и выпуск углехимических продуктов с высокой добавленной стоимостью.

На момент принятия Комплексной программы социально-экономического развития Ленинск-Кузнецкого городского округа до 2025 года (решение городского Совета народных депутатов № 123 от 23.12.2010 г.) потребности в тепловой энергии населения территории обеспечивали 21 муниципальная и 2 ведомственные котельные, в том числе 22 котельные оказывали услуги по отоплению и горячему водоснабжению на территории города, одна муниципальная котельная отапливала жилой фонд и учреждения социальной сферы поселка Никитинский. Теплоснабжение г. Ленинска-Кузнецкого осуществлялось через 5 бойлерных, 2 насосных станции и 7 центральных тепловых пунктов, в которых установлено 44 теплообменника. В 7 котельных полностью механизированы процессы подачи топлива и удаления шлака, остальные котельные оснащены топками с ручным удалением шлака, 9 котельных оборудованы установками химводоочистки. Физический износ зданий котельных и бойлерных города составляет 62 % (у 5 из 21 котельной износ 100 %). Физический износ оборудования котельных достигает 64 %. Ориентировочное потребление тепла в г. Ленинске-Кузнецком составляет 750 тыс. Гкал/год, или около 150 Гкал/ч.

В связи со значительным износом котельного оборудования и тепловых сетей потери тепловой энергии при ее производстве и транспортировке превышают 20 % при установленных нормативных потерях 12 %. Аналогичное состояние объектов теплоснабжения характерно и для г. Полысаево.

С целью решения энергетических, экономических и экологических проблем системы теплоснабжения Ленинск-Кузнецкого городского округа авторским коллективом предлагается проект генерации тепла Беловской ГРЭС, что позволит отказаться от строительства новых котельных взамен малоэффективных действующих. Установленная мощность Беловской ГРЭС составляет 1260 МВт, тепловая – 229 Гкал/ч.

В рамках реализации рассматриваемого проекта предлагается использовать частичное, совместное с основным пылеугольным топливом, сжигание водоугольного топлива (ВУТ) в котлах ПК-40 в количестве до 25 % (по выделяемой теплоте сгорания). Такое техническое решение позволит получить значитель-

ный экономический эффект и повысить экологическую безопасность ГРЭС, при этом не повлияет на тепловой баланс котельных агрегатов и не потребует их реконструкции.

Такой вид топливного ресурса, как водоугольное топливо, достаточно изучен в отечественной и мировой практике [13–17]. Первая опытно-промышленная установка по приготовлению ВУТ была реализована при Беловской ГРЭС (г. Белово, Кемеровская область), там же был построен опытно-промышленный углепровод Белово – Новосибирск. Годы реализации проектов: 1986–1997. За это время было приготовлено и сожжено в котле ПК-40А Беловской ГРЭС более 15 тыс. т ВУТ, а приготовлено и перекачано по трубопроводу и сожжено в котлах ТПЕ-214 Новосибирской ТЭЦ-5 более 350 тыс. т ВУТ. В то время впервые в мировой практике полностью переведен на сжигание водоугольного топлива котел теплопроизводительностью 670 т/ч и осуществлен гидротранспорт водоугольного топлива на расстояние 262 км. Достигнуто снижение в дымовых газах содержание оксидов азота NO_x на 25–30 % и снижение концентрации других вредных веществ при сжигании ВУТ до 15–70 %.

Сооружение углепроводов также не является редкостью, они используются в ряде стран (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Протяженность и пропускная способность углепроводов в мировой практике
Length and capacity of coal slurry pipelines in the world

Страна	Протяженность углепровода, км	Пропускная способность углепровода, тыс. т
США	20000	250000
Франция	7,2	330
Канада	1287	10200
Польша	400	5000
Китай	Нет данных	30000
Индия	2500	26000

В последнее десятилетие водоугольное топливо стало весьма востребованным. Ряд проектов реализован в Казахстане, Узбекистане, Армении, Австрии, Ирландии, что открывает широкие возможности для экспорта производимой продукции. В настоящее время представляется актуальным восстановление строительства углепроводов в Кузбассе, так как они экономически более выгодны по сравнению с железнодорожными перевозками угля, а приготовление и сжигание водоугольного топлива экономически выгоднее сжигания в топках мазута.

Проведенные натурные исследования при сжигании водоугольного топлива, приготовленного на основе фильтр-кека обогатительных фабрик, на экспериментальной установке Сибирского государственного индустриального университета (рис. 1 и 2) мощностью 500 кВт показали следующие значения вредных выбросов в дымовых газах: оксиды азота NO_x– не более 190 мг/м; оксиды серы SO_2 – не более 20 мг/м^3; оксид углерода CO – не более 135 мг/м^3; пыль – не более 48 мг/м^3; полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) отсутствуют. Кроме того, обеспечивается снижение выбросов углекислого газа CO_2 до 2 раз по сравнению со слоевым сжиганием рядового угля.

Экономическая эффективность использования водоугольного топлива определяется:

– 15–25 % экономией сжигаемого угля;

– снижением на 20–35 % себестоимости выработки 1 Гкал/ч тепловой энергии в зависимости от типа котла;

– вовлечением в энергетику низкокачественных углей при высокой эффективности и экологически чистом их сжигании;

– значительным снижением расходов на утилизацию золы и шлаков от работы котельных, так как практически 70 % их объемов может быть использовано при производстве, например, строительных материалов.

Беловская ГРЭС сжигает около 4500 тыс. т угля в год, при этом на расстоянии 30–35 км от нее находятся обогатительные фабрики шахт «Заречная», им. С. М. Кирова и «Комсомолец», производящие более 1,5 млн т фильтр-кека, который вывозится в отвалы, выветривается, пылит, выделяет газовые испарения в летний период, ухудшая экологическую обстановку района.

В то же время фильтр-кек – это готовый полуфабрикат для получения водоугольного топлива с характеристиками, позволяющими осуществлять его эффективное совместное сжигание в котельных агрегатах, работающих на угле. Характеристики водоугольного топлива, приготовленного на основе фильтр-кека обогатительных фабрик шахт им. С. М. Кирова и «Комсомолец», приведены в табл. 2.

В связи с вышеизложенным предлагаемый авторским коллективом проект включает реализацию ряда мероприятий.

1. Создание специализированной надземной транспортной технологической линии, проложенной на эстакадах и опорах и состоящей из:

– трубопровода для гидротранспорта ВУТ производительностью 1,5 млн т в год, что позволит транспортировать водоугольное топливо для Беловской ГРЭС, приготовленное на основе высоковлажных угольных шламов обогатительных

Таблица 2
Table 2

Характеристики водоугольного топлива, приготовленного на основе фильтр-кека обогатительных фабрик шахт им. С. М. Кирова и «Комсомолец»

Characteristics of filter cake-based coal slurry prepared at coal processing plants of the Kirov Coal Mine and Komsomolets Coal Mine

Показатель, единица измерения	Значение показателя
Крупность частиц, мм	0–0,200
Массовая доля твердой фазы, %	56,6–58,6
Зольность твердой фазы, %	26,0–48,4
Эффективная вязкость, мПа · с	119–444
Низшая теплота сгорания МДж/кг (ккал/кг)	8,24–12,72 (1967–3037)
Расход топлива на производство 1 МВт (Гкал/ч), т	0,361 (0,420)

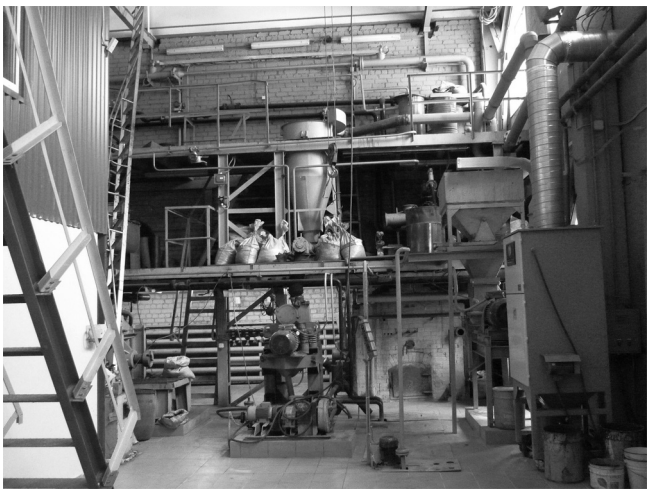


Рис. 1. Блок приготовления водоугольного топлива экспериментальной установки, Сибирский государственный индустриальный университет

Fig. 1. Coal slurry preparation part of the lab unit, Siberian State Industrial University

фабрик шахт им. С. М. Кирова и «Комсомолец» (и, возможно, шахты «Заречная»);

– теплотрассы, состоящей из прямого и обратного трубопроводов, предназначенной для теплоснабжения потребителей, расположенных вдоль трассы, и предотвращения замерзания ВУТ в процессе его гидротранспортирования.

2. Создание технологического комплекса по приготовлению суспензионного водоугольного топлива на основе угольных шламов обогатительных фабрик АО «СУЭК-Кузбасс» производительностью 150 т/ч (1200 тыс. т в год) с дальнейшей транспортировкой ВУТ по трубопроводу на Беловскую ГРЭС.

3. Установка емкостей-хранилищ водоугольного топлива и насосной станции на промплощадке Беловской ГРЭС с оборудованием трех действующих котлов горелочными устройствами (8 шт.) с форсунками для подачи и сжигания ВУТ с целью частичной замены пылеугольного топлива. Система не потребует модернизации тягодутьевого оборудования и систем золошлакоудаления и газоочистки. При этом обеспечивается устойчивая работа котлов в номинальном режиме при значительном снижении экологически опасных выбросов в газовых продуктах сгорания.

Рис. 2. Блок сжигания водоугольного топлива экспериментальной установки, Сибирский государственный индустриальный университет

Fig. 2. Coal slurry burning part of the lab unit, Siberian State Industrial University

4. Изменение действующей схемы теплоснабжения городов Полысаева и Ленинска-Кузнецкого от местных низкоэффективных, экологически небезопасных, с практически полностью выработанным ресурсом, требующих капитального

ремонта котельных на централизованное снабжение теплом от Беловской ГРЭС.

По предварительным оценкам, инвестиционные затраты на реализацию предлагаемого проекта составят 2,5–3,0 млрд руб. При этом его внедрение принесет значительный экономический и экологический эффект.

Ориентировочное теплопотребление г. Ленинска-Кузнецкого – 750 тысяч Гкал/год, или около 150 Гкал/ч. Для обеспечения выработки такого количества тепла при среднем КПД действующих котельных города около 60 % необходимо сжечь порядка 300 тыс. т угля с низшей теплотой сгорания 5 Гкал/т. Сжигание такого количества угля является серьезной экологической нагрузкой со следующими показателями выбросов вредных веществ: SO_2 – 3250 т, CO – 15 200 т, CO_2 – около 600 тыс. т, NO_2 – 1390 тыс. т, твердые пылевидные – 12 тыс. т, около 120 тыс. т золы и шлаков и др.

Изготовление 1–1,5 млн т водоугольного топлива в год с поставкой на Беловскую ГРЭС обеспечит возможность утилизации шламов и кеков обогатительных фабрик АО «СУЭК», при этом компания будет ежегодно получать более 400 млн руб. дополнительной прибыли от реализации этих отходов.

Кроме значительного улучшения экологической составляющей, сжигание более 1 млн т ВУТ на Беловской ГРЭС позволит уменьшить количество потребляемого угля на 73,2 т/ч, или 641 тыс. т в год. Стоимость пылеугольного топлива на Беловской ГРЭС составляет 1320 руб./т, стоимость водоугольного топлива – 660 руб./т. Годовой экономический эффект от совместного сжигания угля и водоугольного топлива в котлах Беловской ГРЭС составит 186 млн. руб. Помимо этого, Беловская ГРЭС будет поставлять тепло в объеме 750 тыс. Гкал в год. Даже при относительно низкой цене в 1000 руб./Гкал дополнительный доход от продажи тепла составит более 500 млн руб. в год.

Суммарный экономический эффект от реализации предлагаемого проекта составит более 1,1 млрд руб. в год. При этом интегральный экономический эффект будет включать экономию средств, не потраченных на строительство, модернизацию и эксплуатацию котельных, прибыль от реализации несожженного угля за счет его замены водоугольным топливом и экономию в стоимости единицы тепла, получаемого при централизованном теплоснабжении потребителей.

Литература / References

1. Hussain, A., Arif, S. M., Aslam, M. (2017). Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 71, 12–28. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033.

2. Guo, P., Kong, J., Guo, Y., Liu, X. (2019). Identifying the influencing factors of the sustainable energy transitions in China. *Journal of Cleaner Production,* 215, 757–766. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.107.

3. Qian, X., Wang, D., Wang, J., Chen, S. (2019). Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China. *Resources Policy,* 101447. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101447.

4. Chernikova, O., Zlatitskaya, Y., Klimashina, Y. (2019). Benchmarking sustainable energy technologies in cross-border regions: issues of economic efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 395, 012102. https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012102.

5. Martins, V. W. B., Rampasso, I. S., Siltori, P. F. S., Cazeri, G. T., Anholon, R., Quelhas, O. L. G., Leal Filho, W. (2020). Contributions from the Brazilian industrial sector to sustainable development. *Journal of Cleaner Production,* 272, 122762. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122762.

6. Glushakova, O. V., Chernikova, O. P., Strekalova, S. A. (2020). Integral Assessment of the Corporate Strategy Effectiveness in the Iron and Steel Industry. *Steel in Translation,* 50(5), 309–316. https://doi.org/10.3103/s0967091220050058.

7. Chernikova, O. P., Strekalova, S. A., Zhdanova, N. G., Grinkevich, O. V. (2020). Formation of a commodity fuel portfolio of Kuzbass on the basis of coal preparation waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 976, 012014. https://doi.org/10.1088/1757-899x/976/1/012014.

8. Mealy, P., Teytelboym, A. (2020). Economic complexity and the green economy. Research Policy, 103948. https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103948.

9. Hummels, H., Argyrou, A. (2021). Planetary demands: Redefining sustainable development and sustainable entrepreneurship. *Journal of Cleaner Production,* 278, 123804. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123804.

10. Du Z., Lin B. (2018). Analysis of carbon emissions reduction of China's metallurgical industry. *Journal of Cleaner Production,* 176, 1177–1184. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.178.

11. Schlör, H., Venghaus, S., Hake, J.-F. (2017). Green Economy Innovation Index (GEII) – a normative innovation approach for Germany & its FEW Nexus. *Energy Procedia,* 142, 2310–2316. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.159.

12. Lin B., Xu M. (2019). Exploring the green total factor productivity of China's metallurgical industry under carbon tax: A perspective on factor substitution. *Journal of Cleaner Production,* 233, 1322–1333. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.137.

13. Murko, V. I., Khyamyalyainen, V. A., Baranova, M. P. (2019). The Creation of a low-capacity boiler plant on coal-enrichment waste. *2019 International Science and Technology Conference EastConf*. https://doi.org/10.1109/eastconf.2019.8725397.

14. Oh, G., Ra, H. W., Yoon, S. M., Mun, T. Y., Seo, M. W., Lee, J.-G., Yoon, S. J. (2019). Syngas production through gasification of coal water mixture and power generation on dual-fuel diesel engine. *Journal of the Energy Institute,* 92(2), 265–274. https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.009.

15. Vershinina, K., Shabardin, D., Strizhak, P. (2019). Burnout rates of fuel slurries containing petrochemicals, coals, and coal processing waste. *Powder Technology,* 343, 204–214. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.052.

16. Wang, R., Liu, J., Lv, Y., Ye, X. (2016). Sewage sludge disruption through sonication to improve the co-preparation of coal–sludge slurry fuel: The effects of sonic frequency. *Applied Thermal Engineering,* 99, 645–651. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.098.

17. Hao, H., Liu, Z., Zhao, F., Du, J., Chen, Y. (2017). Coal-derived alternative fuels for vehicle use in China: A review. *Journal of Cleaner Production,* 141, 774–790. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.137.

Для цитирования:

Мурко В. И., Черникова О. П. Повышение экологичности и эффективности городской системы теплоснабжения с использованием водоугольного топлива / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 18–22. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-18-22.

Cite this paper:

Murko, V. I., Chernikova, O. P. (2021). Improvement of sustainability and efficiency of urban heating using coal-water slurry fuel. *Energy Safety and Energy Economy,* 3, 18–22 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-18-22.

Improvement of sustainability and efficiency of urban heating using coal-water slurry fuel

V. I. Murko,
Siberian State Industrial University, Doctor of Science, professor

O. P. Chernikova,
Siberian State Industrial University, PhD, associate professor

Coal-water slurry fuel is coming into use in heat generation facilities as an alternative to natural gas and heavy oil. The main advantage of coal slurry is its cost efficiency. Our project is devoted to improvement of heat generation using coal-water slurry fuel instead of investing in new construction of coal-burning boiler houses. As an example, we considered implementing this project in the city of Leninsk-Kuznetsky, Russia. The project implies partial burning of coal slurry along with conventional coal burning. This solution is cost efficient and environmentally friendly yet not requiring major heat generation equipment replacement or renovation. The total cost efficiency of the suggested project is estimated at least as 1.1 billion rubles per year.

Keywords: *energy efficiency, coal, coal-water slurry fuel, coal preparation waste.*

УДК 621.039:62-622 DOI 10.18635/2071-2219-2021-3-23-30

Прогнозный сравнительный анализ модернизации АЭС на базе комбинирования с автономным водородным энергокомплексом и газотурбинной установкой

В. Е. Юрин,
Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика», доктор технических наук

Д. О. Башльков,
АО «Русатом – Автоматизированные системы управления», инженер 1-й категории, кандидат технических наук

В отечественной энергосистеме прослеживается дефицит маневренных энергоустановок, способных экономично и надежно проходить провалы нагрузки и обеспечивать энергосистему электроэнергией в часы повышенной нагрузки. На полупиковый режим переведено большинство тепловых станций на органическом топливе, что негативно сказывается на их экономичности и надежности. Старение оборудования тепловых электростанций, постоянный рост цен на органическое топливо и требований к экологической безопасности ведут к логичной необходимости роста доли атомных станций. Альтернативные возобновляемые энергоисточники на данный момент имеют действительно экономически эффективные перспективные решения только в ряде южных регионов. Аналогичная ситуация имеет место и в ряде зарубежных стран. При этом рост доли АЭС, сопровождаемый переизбытком базовой мощности в энергосистеме, усугубляет проблемы, связанные с прохождением минимумов и максимумов нагрузки, вследствие экономически оправданной загрузки атомных электростанций с максимальным коэффициентом использования установленной мощности. Кроме того, для АЭС имеются технологические ограничения маневренных свойств. Эти проблемы можно устранить, найдя эффективные пути участия АЭС в регулировании неравномерности энергопотребления. Одним из таких путей может стать комбинирование с позволяющими аккумулировать дешевую внепиковую энергию и использовать ее в часы повышенной нагрузки установками, такими как разработанный авторами автономный водородный энергокомплекс. Использование аккумулирующих систем позволит повысить эффективность участия АЭС в покрытии неравномерностей графиков электрической нагрузки, сократить выбросы в окружающую среду и увеличить экспорт органического топлива за счет снижения доли тепловых электростанций. Кроме того, ранее авторами было показано, что маломощная паровая турбина, используемая в автономном водородном энергетическом комплексе для генерации электроэнергии в энергосистему в часы повышенной нагрузки, может быть эффективно применена при обесточивании АЭС для электроснабжения собственных нужд станции с использованием только энергии остаточного тепловыделения реакторной установки.

Ключевые слова: *атомная электростанция, автономный водородный комплекс, паротурбинная установка, удельный показатель комплексной эффективности.*

Обеспечение атомных электростанций базовой нагрузкой и расширение регулировочного диапазона их мощности может быть достигнуто посредством внедрения установки аккумулирующих установок. Известным эффективным способом запасать энергию в часы спада нагрузки в энергосистеме является химическое аккумулирование на основе водородного энергокомплекса. Авторами разработан автономный водородный энергокомплекс (АВК), который при комбинировании с АЭС позволяет аккумулировать дешевую электроэнергию в часы спада нагрузки в энергосистеме в виде водородного топлива за счет электролиза воды и накопления горячей воды в баках-аккумуляторах.

Аккумулированная энергия может быть использована для генерации дополнительной электроэнергии для покрытия пиковой или полупиковой зоны суточной нагрузки в энергосистеме. Аккумулирование энергии посредством вырабатываемой на АЭС электроэнергии с использованием электролизеров позволит в отличие от, например, тепловых аккумуляторов в часы зарядки аккумулятора избежать переменного расхода рабочего тепла на основной паровой турбине и, соответственно, снижения ее ресурса вследствие этого.

Использование в составе автономного водородного энергокомплекса водород-кислородного парогенератора и маломощных паротурбинных установок (ПТУ) позволит в часы разрядки системы аккумулирования избежать переменного расхода в парогенераторах АЭС и основной ПТУ и, как следствие, доро-

гостоящей модернизации парогенераторов и основной турбины, а также увеличения их износа. Использование баков-аккумуляторов позволяет снизить капиталовложения в дорогостоящее оборудование водородного комплекса. Кроме того, наличие маломощных дополнительных ПТУ позволит обеспечить дополнительный резерв электроснабжения собственных нужд АЭС и отказаться от дорогостоящих теплообменников систем пассивного отвода тепловыделения (СПОТ) активной зоны реактора при сохранении требуемого МАГАТЭ уровня безопасности [1, 2].

Для обеспечения комплексности исследования подобных АВК многофункциональных энергоустановок авторами разработаны и научно обоснованы основы методологии комплексного исследования, позволяющей сравнивать пути совершенствования АЭС с учетом всех выполняемых новыми установками функций на основе приведения имеющих место быть факторов к экономическому эффекту. Результат достигается путем приведения всех исследуемых эффектов, включая обеспечение безопасности, к удельным показателям, выраженным в денежном эквиваленте по отношению к единице вложенных средств. Разработанный комплекс уравнений позволяет провести многофакторное исследование вариантов модернизации атомных станций и получить в результате итоговые суммарные удельные показатели, которые учитывают выполнение растущих требований безопасности в условиях рыночной экономики и суточной неравномерности графика электропотребления [3].

В предыдущих исследованиях было показано, что экономическая эффективность АВК напрямую зависит от отпускного тарифа на электроэнергию во внепиковые часы электрической нагрузки. При высоком тарифе затраты на зарядку аккумуляторов снижают экономическую эффективность АВК вплоть до отсутствия окупаемости системы. Известный альтернативный вариант повышения экономически эффективной маневренности с обеспечением дополнительного резервирования собственных нужд на случай полного обесточивания – это комбинирование АЭС с установками, работающими на природном газе [2]. Сравнительное исследование технических решений комбинирования АЭС с АВК и ПГУ будет проведено на основании прогнозных данных с использованием представленной ранее методики комплексного исследования путей совершенствования АЭС.

Разработанная и запатентованная авторами схема комбинирования энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 и АВК представлена на рис. 1. По условиям взрывопожаробезопасности оборудование водородного комплекса может быть размещено на безопасном расстоянии от энергоблоков.

На рис. 1: 1 – устройство парораспределения; 2 – водород-кислородный парогенератор; 3 – маломощная ПТУ; 4 – электрический генератор; 5 – конденсатор; 6 – конденсатный насос; 7 – бак холодной воды; 8 – насос холодной воды; 9 – поверхностные пароводяные теплообменники; 10 – дренажный насос; 11 – бак горячей воды; 12 – питательный насос; 13 – бак-аккумулятор для нужд электролизной установки; 14 – система компримирования водорода и кислорода; 15 – система хранения водорода и кислорода; 16 – электролизная установка; 17 – резервный паропровод; I – пар из парогенераторов энергоблока; II – слив дренажа в тракт питательной воды энергоблока.

В часы спада нагрузки в энергетической системе в электролизной установке 16 осуществляется выработка водорода и кислорода, накапливаемых в емкостях 15. В это же время часть пара из парогенераторов энергоблока подается в теплообменники 9. При этом из бака холодной (БХВ) 7 в бак горячей воды (БГВ) 11 перекачивается холодная вода, проходя через теплообменники 9 и забирая тепло у свежего пара из парогенераторов. В часы повышенной нагрузки H_2 и O_2 из емкостей 15 и горячая вода из БГВ 11 поступают в водород-кислородный парогенератор 2 [4, 5]. Полученный пар подается на маломощные паровые турбины 3, работающие на выработку электроэнергии в энергосистему.

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения собственных нужд АЭС при полном обесточивании станции одна из маломощных ПТУ 3 в часы простоя водородного комплекса находится в режиме холостого хода. Выработка электроэнергии при обесточивании может осуществляться маломощной ПТУ за счет только энергии остаточного тепловыделения реактора [1]. При нехватке энергии остаточного тепловыделения реактора могут быть использованы аккумулированные водород, кислород и горячая вода, которые могут быть использованы при [2]. При отказе ПТУ в работу включается традиционная система аварийного электроснабжения с дизель-генераторами.

Исходные данные для экономической оценки комбинирования АВК и АЭС с ВВЭР-1000: зарядка – 9 ч; разрядка – 15 ч. Мощность одной из ПТУ АВК – 12 МВт (требование для реализации способа расхолаживания АЭС с использованием остаточного тепловыделения [2]). Мощность второй ПТУ подбирается исходя из условия, чтобы запас мощности паровых турбин АВК с 75 до 100 % нагрузки был суммарно равен 2 % суммарной мощности энергокомплекса АЭС + АВК. Для расчетов принята минимальная допустимая мощность второй дополнительной ПТУ – 75 МВт. Дополнительные турбины в штатном режиме работают на нагрузке 75 % (при сопловом парораспределении внутренний КПД снижается незначительно), тогда по требованию системного оператора (СО) может быть реализован подъем мощности дополнительных ПТУ до 100 % и, таким образом, обеспечен подъем мощности энергокомплекса АЭС + АВК на 2 % (требование СО ЕЭС РФ по участию АЭС в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме [6]). Таким образом, в штатном режиме две ПТУ АВК будут выдавать суммарную мощность 65 МВт. На основании приведенной ранее методики исследования водородных энергокомплексов [2, 3] определен необходимый для генерации ПТУ АВК требуемой мощности расход водородного топлива: 12/75 МВт – 0,21/1,12 кг/с для температуры, запа-

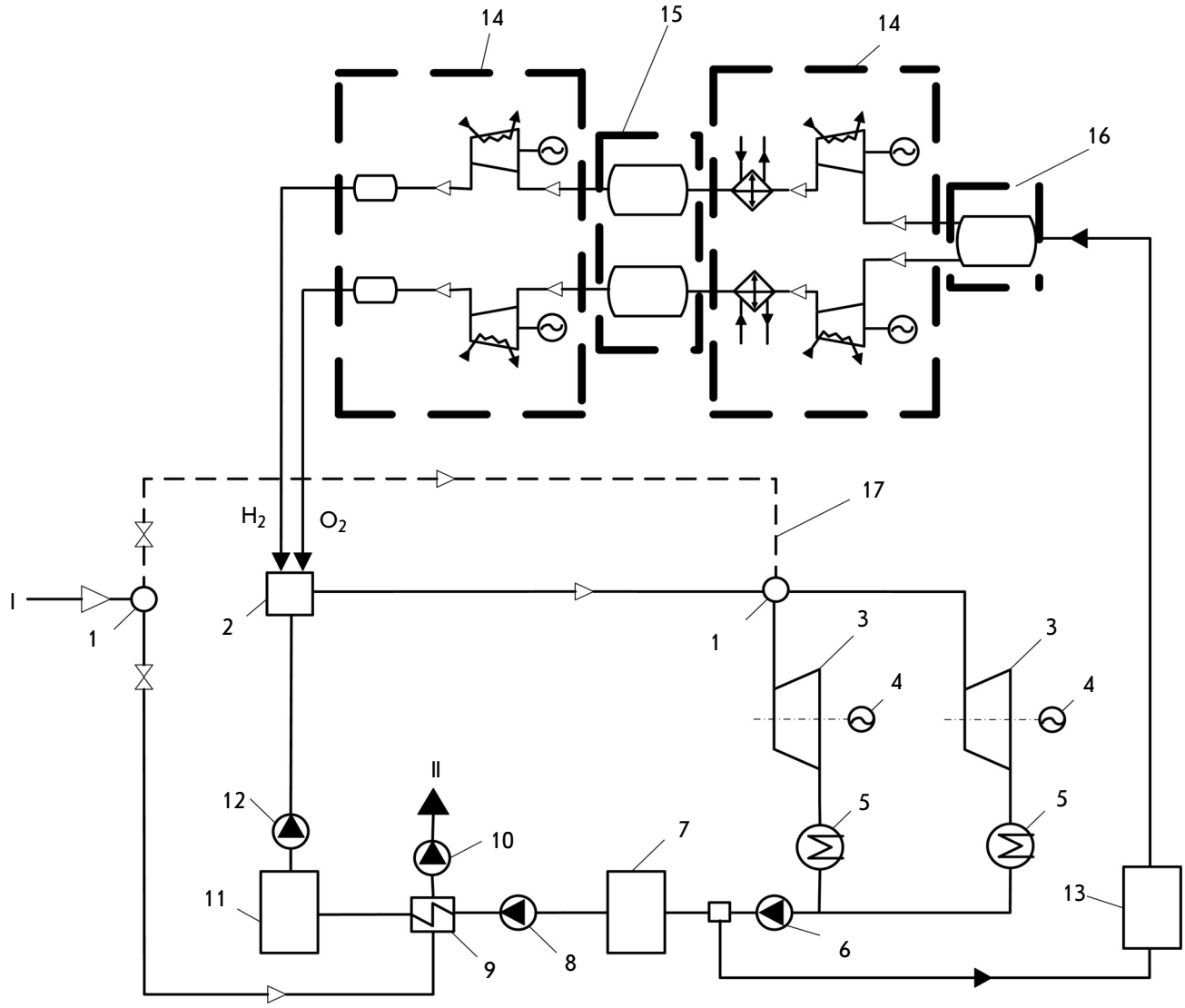


Рис. 1. Схема комбинирования АЭС с автономным водородным комплексом

Fig. 1. Combination of an NPP and autonomous hydrogen power complex

саемой в баке и подаваемой в водород-кислородную камеру сгорания питательной воды – 270 °С. Для работы комплекса, согласно выбранным условиям, необходимо запасти 72 т водорода и 575 т кислорода. На основе методики расчета, подробно изложенной в [3 и 7], с учетом вышеприведенных исходных данных капитальные вложения в основные элементы АВК составили 4976 млн руб. Капиталовложения в паротурбинный цех приняты на основании данных ГК «Турбопар» и Балаковской АЭС по состоянию на 2018 год [3]. Ежегодные эксплуатационные затраты в АВК в зависимости от внепикового тарифа на электроэнергию представлены на рис. 2 [3].

Для ПГУ увеличение внепикового тарифа на электроэнергию будет иметь обратный эффект, так как при прежних затратах будет увеличиваться получаемая во внепиковые часы электрической нагрузки прибыль. Для проведения сравнительного анализа с АВК выбрана ПГУ-100, установленная на

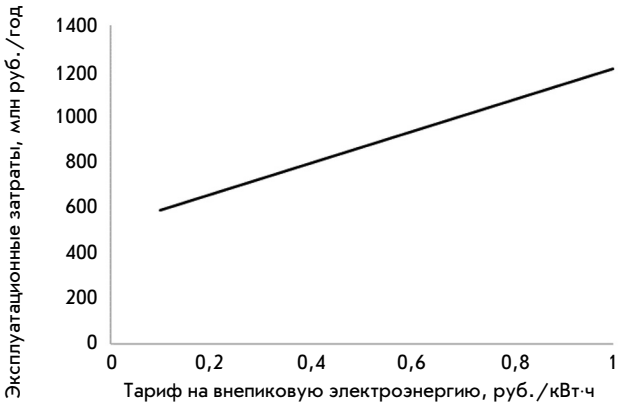


Рис. 2. Годовые эксплуатационные затраты автономного водородного комплекса в зависимости от внепикового тарифа на электроэнергию

Fig. 2. Annual operating costs of an autonomous hydrogen complex considering off-peak power rates

Тюменской ТЭЦ-1: газотурбинная установка Ansaldo AE64.3A мощностью 75 МВт и паровая турбина мощностью 25 МВт [8]. Удельные капиталовложения – 1050 $/кВт [9]. Курс доллара принят равным 70 руб. Для участия в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме ПГУ должна работать на режиме нагрузки 75 % (75 МВт). Тогда при наборе мощности до 100 % прирост суммарной мощности энергокомплекса АЭС + ПГУ составит 25 МВт, что обеспечит необходимые 2 % (требование оператора СО ЕЭС РФ). Во внепиковые часы нагрузки ПГУ не отключается для обеспечения бесперебойного резервирования собственных нужд АЭС. Для расчетов принято, что ПГУ работает на 50 % нагрузки в течение 9 ч в соответствии с рекомендациями, приведенными в [10]. Капиталовложения в дополнительный газопровод рассчитывались на примере Балаковской АЭС. Длина газопровода принята равной расстоянию от АЭС до Балакова, т. е. 12,5 км. С целью обеспечения надежности газопровод дублируется, составляет приблизительно 25 км. Его удельная стоимость принимается равной 10 000 руб./м. Расчеты выполнялись для условий среднегодовой температуры воздуха 7,1 °С на примере Саратовской области. Стоимость топливного газа принята равной 5500 руб. /1000 м^3. Динамика роста стоимости топливного газа составила 3 % в год.

В [3] подробно показаны и объяснены показатели эффектов, достигаемых при вариантах модернизации АЭС. В итоге показатели всех достигаемых эффектов, включая безопасность и системные эффекты, сводятся к суммарным показателям, что становится возможным благодаря одинаковой размерности показателей различных эффектов: руб./руб. В настоящей работе для сравнения АВК и ГТУ приведен итоговый удельный показатель комплексной эффективности, руб./руб.:

$$\Pi_{\text{компл}} = \frac{\sum\limits_{T_{\text{нс}}}^{T_n}\left\{\left[-K_i + K_i^{\text{зам}} + \sum\limits_{1}^{x}(P_i^{\text{пр.}x}\cdot \text{Ц}_i^{\text{пр.}x} - \Sigma\text{З}_i^{\text{пр.}x}) + \underline{+\text{Ц}_{\text{г.}i}^{\text{эксп}}\cdot G_i\cdot\xi_i + (\lambda_{\text{баз}} - \lambda_{\text{баз}}^{\text{ДЭИ}})\cdot Y_i\cdot m +}\right.\right.}{\sum\limits_{T_{\text{нс}}}^{T_{\text{кс}}} K_i\cdot(1+E)^{T_1-T_i}}, \quad (1)$$

$$\frac{\left.\left.+(N_\alpha\cdot(\tau_i^{\text{п}}\cdot t_i^{\text{п}} + \tau_i^{\text{пп}}\cdot t_i^{\text{пп}} + \tau_i^{\text{вн}}\cdot t_i^{\text{вн}})\cdot n_{\text{дн.}i} - \Sigma\text{З}_{\alpha.i}^{\text{АЭС}})\right]\cdot(1+E)^{T_1-T_i}\right\}}{},$$

где K_i – капиталовложения в модернизацию действующей станции в i-й год, руб.;

$K_i^{\text{зам}}$ – капиталовложения в замещаемое оборудование в i-й год, руб.;

$P_i^{\text{пр.}x}$ – отпускаемая продукция x (например, количество отпущенной за i-й год электроэнергии, кВт·ч);

$\text{Ц}_i^{\text{пр.}x}$ – отпускная цена за продукцию x (например, отпускной тариф на электроэнергию в i-й год, руб./кВт·ч);

$\Sigma\text{З}_i^{\text{пр.}x}$ – суммарные эксплуатационные затраты на производство продукции x в i-й год, руб.;

$\text{Ц}_i^{\text{эксп}}$ – стоимость топливного газа на экспорт в i-й год, руб./м^3;

G_i – количество замещенного топливного газа в i-й год, м^3;

ξ_i – доля от продажи замещенного топливного газа на экспорт, которая может выплачиваться государством в виде стимулирующих выплат на развитие маневренных возможностей АЭС в i-й год;

$\lambda_{\text{баз}}$, $\lambda_{\text{баз}}^{\text{ДЭИ}}$ – итоговые значения интенсивности отказа системы аварийного электроснабжения (САЭ) с последующим повреждением активной зоны реактора при расхолаживании в аварийной ситуации, сопровождаемой полным обесточиванием станции, посредством использования базовой САЭ / базовой САЭ с дополнительным энергоисточником, соответственно, 1/реактор·год;

Y_i – вероятный ущерб от аварии с повреждением активной зоны реактора на одном энергоблоке в i-й год, руб.;

m – количество обеспечиваемых резервом энергоблоков;

$\tau_i^{\text{п}}$, $\tau_i^{\text{пп}}$, $\tau_i^{\text{вн}}$ – отпускной тариф на пиковую / полупиковую / внепиковую электроэнергию в i-й год, соответственно, руб./кВт·ч;

$t_i^{\text{п}}$, $t_i^{\text{пп}}$, $t_i^{\text{вн}}$ – время работы на покрытие пиковой / полупиковой / внепиковой части суточного графика электрической нагрузки в i-й год, соответственно, ч;

$n_{\text{дн.}i}$ – количество дней в году, в которые энергокомплекс находится в работе;

α – необходимый резерв мощности АЭС, %;

N_α – α % мощности энергоблоков, обеспечиваемых возможностью участия в первичном регулировании частоты тока посредством комбинирования с многофункциональной установкой, кВт;

$\Sigma\text{З}_{\alpha.i}^{\text{АЭС}}$ – суммарные затраты на генерацию α % мощности на обеспечиваемых возможностью участия в первичном регулировании частоты тока энергоблоках АЭС в i-й год, руб.;

$T_{\text{нс}}$ / $T_{\text{кс}}$ / T_1 / T_n / T_i – год начала модернизации АЭС / год завершения модернизации / первый год эксплуатации / последний год эксплуатации / текущий год исследования соответственно;

E – норма дисконта.

Укрупненный анализ надежности резервирования собственных нужд АЭС на основе дополнительной паровой турбины совместно со стандартной трехканальной системой аварийного электроснабжения с дизель-генераторами (ДГ) показал, что при таком комбинировании достигается требуемый МАГАТЭ уровень безопасности [2]. Таким образом, установка дополнительной ПТУ позволяет отказаться от дорогостоящих теплообменников системы пассивного теплоотвода (СПОТ) [3]. В работе стоимость теплообменников СПОТ на один энергоблок принята на примере Курской АЭС-2: 1094 млн руб. (на основе данных официального сайта о размещении заказов на закупки товаров, работ и услуг для нужд госкорпорации Росатом на 2018 г. [11]). При расчетах

использованы результаты укрупненного анализа надежности систем резервирования собственных нужд АЭС. Подробная методика расчета изложена в [2]. Для определения экономического эффекта от снижения риска возникновения повреждения активной зоны (ПАЗ) реактора за исходную была взята интенсивность отказа трехканальной САЭ – $4{,}4 \cdot 10^{-5}$ 1/реакт.·год.

На основании данных ОАО «Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии» [12], организующего торговлю на оптовом рынке электроэнергии и мощности, по данным за 2018 г., базовый отпускной тариф на электроэнергию для Балаковской АЭС составил 1,286 руб./кВт·ч, а плата за мощность – 3695 тыс. руб./МВт в год. В связи со сниженным электропотреблением во внепиковые часы нагрузки тариф на электроэнергию снижается и, как следствие, работа маневренных энергоустановок становится невыгодной. К примеру, по опыту работы электростанций в районе эксплуатации Балаковской АЭС формируются заявки на поставку электроэнергии во внепиковые часы нагрузки с минимальной ценой до 0 руб./кВт·ч. В связи с этим принят диапазон внепикового тарифа на электроэнергию: 0,1–1 руб./кВт·ч. Динамика полупикового тарифа на электроэнергию принята на основе прогноза Минэкономразвития по долгосрочному социально-экономическому развитию РФ [13]. Время строительства / срок эксплуатации приняты для расчетов соответственно: 2/25 лет соответственно. Итоговый удельный показатель комплексной эффективности комбинирования АЭС с АВК и ПГУ в зависимости от внепикового тарифа на электроэнергию, рассчитанный по формуле (1), показан на рис. 3.

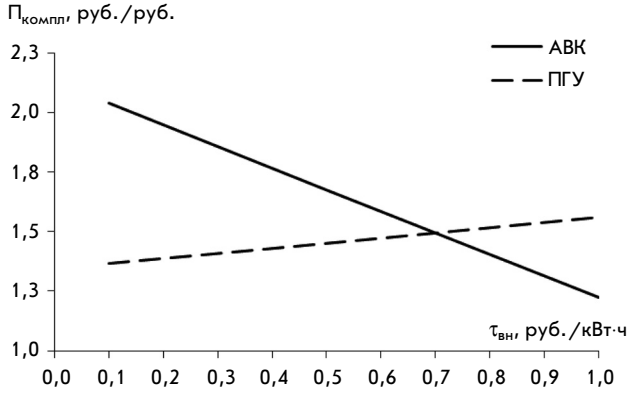


Рис. 3. Итоговый удельный показатель комплексной эффективности комбинирования АЭС с АВК и ПГУ в зависимости от внепикового тарифа на электроэнергию

Fig. 3. Total specific index of NPP complex efficiency when combined with an autonomous hydrogen complex and steam turbine plant considering off-peak power rates

Разработанная методология исследования путей совершенствования АЭС [3] позволяет получить прогнозные показатели для выбранного промежутка времени возможного начала модернизации АЭС с целью учета динамики факторов, влияющих на условия исследования. В качестве примера для определения прогнозных удельных показателей, зависящих от года начала строительства / модернизации исследуемых установок, принято увеличение капиталовложений в установки и затрат на заработную плату персонала в размере 3 % в год. Динамика полупикового тарифа на электроэнергию принята на основе прогноза Минэкономразвития по долгосрочному социально-экономическому развитию РФ [13]. Результаты исследования показаны на рис. 4.

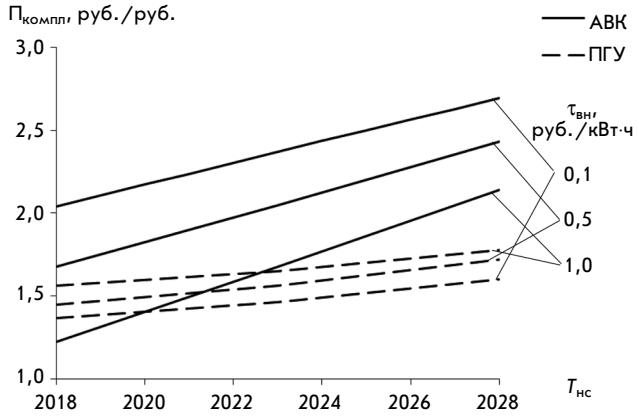


Рис. 4. Итоговый удельный показатель комплексной эффективности комбинирования АЭС с АВК и ПГУ в зависимости от года начала модернизации АЭС

Fig. 4. Total specific index of NPP complex efficiency when combined with an autonomous hydrogen complex and steam turbine plant considering the first year of modernization

Таким образом, при снижении внепикового отпускного тарифа на электроэнергию для атомных станций, с целью обеспечения их участия в регулировании неравномерностей нагрузки в энергосистеме, эффективным шагом развития АЭС станет установка аккумулирующих систем. Эффективным решением является также установка на АЭС сателлитных энергоустановок, работающих на природном газе. И системы аккумулирования, содержащие дополнительную ПТУ, и энергоустановки, работающие на природном газе, при выполнении ряда условий могут обеспечить надежный, постоянно действующий резерв собственных нужд АЭС на случай аварийных ситуаций с обесточиванием, что позволит снизить риск возникновения крупного ущерба от аварий с ПАЗ и сократить инвестиции в новые дорогостоящие системы расхолаживания реакторной установки при сохранении требуемого МАГАТЭ уровня безопасности.

Одним из основных факторов, необходимых для определения приоритета установки газовых или аккумулирующих энергогенерирующих систем, будут являться внепиковый отпускной тариф на электроэнергию и цена на газовое топливо, а также внимание государства к обеспечению возможности снизить внутреннее потребление газа с увеличением объема его продажи на экспорт. Подобные меры могут быть применительно к АЭС простимулированы государством в виде процента от доли государства от продажи природного газа на экспорт, что позволит значительно улучшить экономическую привле-

кательность строительства аккумулирующих систем. Такие меры необходимы для развития аккумулирующих установок в условиях сложившейся тарифной политики. При этом государство, помимо процента прибыли от продажи замещаемого природного газа на экспорт, будет иметь ряд других положительных моментов: улучшение экологической ситуации за счет снижения выбросов, образующихся в результате сгорания органического топлива, обновление маневренных мощностей единой энергосистемы, возможность увеличения доли атомных станций в энергосистеме, благодаря расширению диапазона их эффективного использования (работа в полупиковой и пиковой части графика электрической нагрузки с постоянным коэффициентом использования установленной мощности реакторных установок).

Таким образом, разработанный автономный водородный энергокомплекс при комбинировании с АЭС позволяет аккумулировать дешевую электроэнергию в часы спада нагрузки в энергосистеме в виде водородного топлива за счет электролиза воды и накопления горячей воды в баках-аккумуляторах. Использование баков-аккумуляторов позволяет снизить капиталовложения в дорогостоящее оборудование водородного комплекса. Аккумулированная энергия может быть использована для генерации дополнительной электроэнергии для покрытия пиковой или полупиковой зоны суточной нагрузки в энергосистеме. Маломощная паровая турбина, используемая в АВК для генерации электроэнергии в энергосистему в часы повышенной нагрузки, может быть эффективно применена при обесточивании АЭС для электроснабжения собственных нужд станции с использованием только энергии остаточного тепловыделения реакторной установки. Это позволит снизить риск возникновения крупного ущерба от аварий с ПАЗ и сократить расходы на дорогостоящие системы расхолаживания реакторной установки при сохранении уровня безопасности.

Для исследования подобных многофункциональных систем авторами разработаны основы методологии комплексного исследования, позволяющей сравнивать пути совершенствования АЭС с учетом всех выполняемых новыми установками функций на основе приведения имеющих место быть факторов к экономическому эффекту. Результат достигается путем приведения всех исследуемых эффектов, включая обеспечение безопасности, к удельным показателям, выраженным в денежном эквиваленте по отношению к единице вложенных средств. Разработанный комплекс уравнений позволяет провести многофакторное исследование вариантов модернизации атомных станций и получить в результате итоговые суммарные удельные показатели, которые учитывают выполнение растущих требований безопасности в условиях рыночной экономики и суточной неравномерности графика электропотребления.

На основе разработанной математической модели проведено исследование комплексной эффективности модернизации АЭС посредством комбинирования с АВК и ПГУ в зависимости от внепикового тарифа на электроэнергию и года начала модернизации АЭС для динамики полупикового тарифа на электроэнергию. Исследование показало, что при снижении внепикового отпускного тарифа на электроэнергию для атомных станций с целью обеспечения их участия в регулировании неравномерностей нагрузки в энергосистеме аккумулирующие системы становятся экономически эффективными и конкурентоспособными по сравнению с установками, работающими на органическом топливе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-01053.

Литература

1. Аминов Р. З., Юрин В. Е., Кузнецов Д. Ю. Исследование процессов расхолаживания водо-водяных реакторов на основе использования энергии остаточного тепловыделения для выработки электроэнергии в аварийных ситуациях с обесточиванием / / Атомная энергия. – 2020. – Т. 128. – Вып. 4. – С. 197–202.

2. Аминов Р. З., Юрин В. Е., Егоров А. Н. Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками. – М.: Наука, 2018. – 238 с.

3. Юрин В. Е. Разработка научных основ обеспечения безопасности атомных электрических станций на основе комбинирования с многофункциональными энергогенерирующими установками: дис. ... доктора технических наук: 05.14.01 / СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2020.

4. Malyshenko, S. P., Gryaznov, A. N., Filatov, N. I. (2004). High-pressure H2/O2 – steam generators and their possible applications. *International Journal of Hydrogen Energy,* 29, 589–596. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.08.004.

5. Development of hydrogen-combustion turbine https://www.enaa.or.jp/WE-NET/report/1998/english/8_2.htm.

6. Технические требования к генерирующему оборудованию участников оптового рынка. – М.: Правление АО СО ЕЭС России, 2017.

7. Аминов Р. З., Байрамов А. Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. – М.: Наука, 2016. – 257 с.

8. Газотурбинные технологии [Электронный ресурс]. Код доступа: http://gtt.ru/shop/katalog-energeticheskoe-oborudovanie-2016.

9. Gas turbine world handbook. (2018). Fairfield, Pequot Publishing Inc.

10. Радин Ю. А. Исследование и улучшение маневренности парогазовых установок: диссертация ... доктора технических наук: 05.14.14 / Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт. – М., 2013.

11. Официальный сайт о размещении заказов на закупки товаров, работ и услуг для нужд госкорпорации Росатом [Электронный ресурс]. Код доступа: http://zakupki.rosatom.ru.

12. Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии [Электронный ресурс]. Код доступа: https://www.atsenergo.ru.

13. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. Код доступа: http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20130325_06.

Для цитирования:

Юрин В. Е., Башлыков Д. О. Прогнозный сравнительный анализ модернизации АЭС на базе комбинирования с автономным водородным энергокомплексом и с газотурбинной установкой / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 23–30. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-23-30.

Cite this paper:

Yurin, V. E., Bashlykov, D. O. (2021). Predictive and comparative analysis of NPP modernization with an autonomous hydrogen power complex and gas turbine unit. *Energy Safety and Energy Economy,* 3, 23–30 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-23-30.

Predictive and comparative analysis of NPP modernization with an autonomous hydrogen power complex and gas turbine unit

V. E. Yurin,
Saratov State Technical University, professor, Doctor of Science

D. O. Bashlykov,
Rusatom Automated Control Systems JSC, 1st class engineer, PhD

Optimizing existing nuclear power plants adding developing power technology can help find effective ways of improving variable power loads in an electric power system. One of the most promising options is combining a nuclear power plant with a newly developed autonomous hydrogen complex reported in our research. The ability of storing unused energy and releasing it when needed will raise contribution of nuclear power plants in compensating improving variable power loads, shorten emissions as well as contribution of conventional thermal power plants into electric power generation. Also, as we demonstrated in our previous research results, a low-power steam turbine plant used in the said autonomous hydrogen complex can support an auxiliary power system of a nuclear power plant reusing residual reactor heat in case of an outage.

Keywords: *nuclear power plant, autonomous hydrogen complex, steam turbine, specific indicator of integrated efficiency.*

References

1. Aminov, R. Z., Yurin, V. E., Kuznetsov, D. Y. (2020). Investigation of the cooling of water-cooled and -moderated reactors based on electricity generation via residual heat in emergency situations with de-energization. *Atomic Energy,* 128, 211–217. https://doi.org/10.1007/s10512-020-00676-6.

2. Aminov, R. Z., Yurin, V. E., Egorov, A. N. (2018). *Kombinirovanie AES s mnogofunktsionalnymi energeticheskimi ustanovkami* [A combination of nuclear power plants with multifunctional power units]. Moscow, Nauka.

3. Yurin, V. E. (2020). *Razrabotka nauchnykh osnov obespecheniya bezopasnosti atomnykh elektricheskikh stantsiy na osnove kombinirovaniya s mnogofunktsionalnymi energogeneriruyuschimi ustanovkami* [Development of scientific fundamentals for safety assurance of nuclear power plants combined with multifunctional power plants], Doctor of Science Thesis, Saratov State Technical University.

4. Malyshenko, S. P., Gryaznov, A. N., Filatov, N. I. (2004). High-pressure H2/O2 – steam generators and their possible applications. *International Journal of Hydrogen Energy,* 29, 589–596. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.08.004.

5. Development of hydrogen-combustion turbine. Available at: https://www.enaa.or.jp/WE-NET/report/1998/english/8_2.htm (accessed May 12, 2021).

6. Technical requirements to generation equipment of wholesale market participants. Moscow, SO UES of Russia.

7. Aminov, R. Z., Bayramov, A. N. (2016). *Kombinirovanie vodorodnykh energeticheskikh tsiklov s atomnymi elektrostantsiyami* [Combining hydrogen energy cycles with nuclear power plants]. Moscow, Nauka.

8. Gazoturbinnye tekhnologii. Available at: http://gtt.ru/shop/katalog-energeticheskoe-oborudovanie-2016.

9. *Gas Turbine World Handbook*. (2018). Fairfield, Pequot Publishing Inc., vol. 33.

10. Radin, Yu. A. (2013). *Issledovanie i uluchshenie manevrennosti parogazovykh ustanovok* [Research and improvement of controllability of combined-cycle gas plants], Doctor of Science Thesis, Russian Thermal Engineering Institute, Moscow, pp. 163–165.

11. Official website on procurement of Rosatom State Corporation. Available at: http://zakupki.rosatom.ru (accessed May 12, 2021).

12. Administrator of the trade system of the wholesale electricity market. Available at: https://www.atsenergo.ru (accessed May 12, 2021).

13. Long-term socio-economic forecast development of the Russian Federation until 2030. Available at: http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20130325_06 (accessed May 12, 2021).

УДК 621.31 + 66.04 DOI 10.18635/2071-2219-2021-3-31-40

Кодовое управление параметрическими моделями индукционных нагревателей

А. А. Тяпин,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

В. И. Пантелеев,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, доктор технических наук, профессор

Е. С. Кинев,
ООО «Тепловые электрические системы», г. Красноярск, директор, кандидат технических наук

М. В. Первухин,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, доктор технических наук, доцент

Предложен подход к построению импульсных управляемых моделей индукционных нагревателей. Параметры схем замещения индукторов, предназначенных для нагрева алюминия перед экструзией или для перемешивания расплава, имеют составляющие, обусловленные наличием вторичного элемента. Свойства металла в ходе нагрева меняются, и для создания адекватных математических моделей следует учитывать изменение резистивных и реактивных составляющих схем замещения. В качестве средства управления режимом эквивалентных резистивных двухполюсников предложено кодовое импульсное воздействие на ключи, в динамике изменяющее импеданс схемы. Управление периодом переключения модели при последовательном, параллельном и смешанном соединении элементов может обеспечивать требуемый плавный характер изменения резистивной проводимости. Исследование типовых схем параметрических звеньев выполнено с применением симулятора, при этом получены примеры регулировочных характеристик токов и напряжений. Для проведения численного эксперимента построены переключаемые модели разной разрядности, имеющие свойства аналого-цифровых элементов. В ходе моделирования получено решение для совокупности режимных параметров индукционного устройства.

Ключевые слова: *индукционное устройство, индукционный нагрев, математическое моделирование, параметрическая модель, импульсное кодовое управление.*

Наиболее эффективным средством нагрева алюминия перед прессованием считается индукционный электрический нагрев [1]. Нагревательные индукторы изготавливают из медной трубки, применяя жидкостное охлаждение [2]. Разогрев алюминиевых болванок проводят до достижения температуры 530 °С. Для компенсации реактивной мощности и локального повышения напряжения отдельных секций индукторов широко используют конденсаторные батареи [3]. Величину емкости конденсаторных батарей изменяют параллельным подключением или отключением конденсаторов, посредством силовых ключей. Управление переключениями элементов выполняется автоматически с помощью микроконтроллерной или релейно-контакторной системы управления [4, 5]. В ходе нагрева электрофизические параметры нагревательного комплекса плавно меняются [6]. В составе эквивалентного импеданса загрузки есть резистивные компоненты, изменение которых не в полной мере учитывается в режимах управления регулятора [7], что может приводить к возникновению неточностей в оценке энергоэффективности устройства.

Общий вид электромагнитных индукторов методического и периодического действия для нагрева алюминиевых слитков показан на рис. 1. Конструкции индукторов достаточно разнообразны, а секции могут быть подключены к трехфазной или однофазной сети. В каждом конкретном случае решают задачу рационального электропитания индукционного комплекса. Такая задача зависит от технологических и технических требований, а также схем обмоток.

Пример схемы замещения однофазной индукционной установки с параметрическими элементами показан на рис. 2. В схеме реализовано специальное симметрирующее устройство для трехфазного индуктора. Симметрирующее устройство состоит из конденсаторной батареи и силового дросселя. Таково типовое решение для мощной однофазной нагрузки в виде индуктора ID, предназначенного для нагрева алюминиевых столбов массой в несколько сотен килограммов [8]. Ферромагнитные материалы используются преимущественно как элементы конструкции индукционных устройств, поэтому режимы индукторов можно считать синусоидальными и высшие гармоники не учитывать.

Силовые конденсаторы подключены на напряжение U_{ab}, а электромагнитный дроссель с отводами – на напряжение U_{bc}. Параллельно нагрузке, устанавливают дополнительную регулируемую батарею

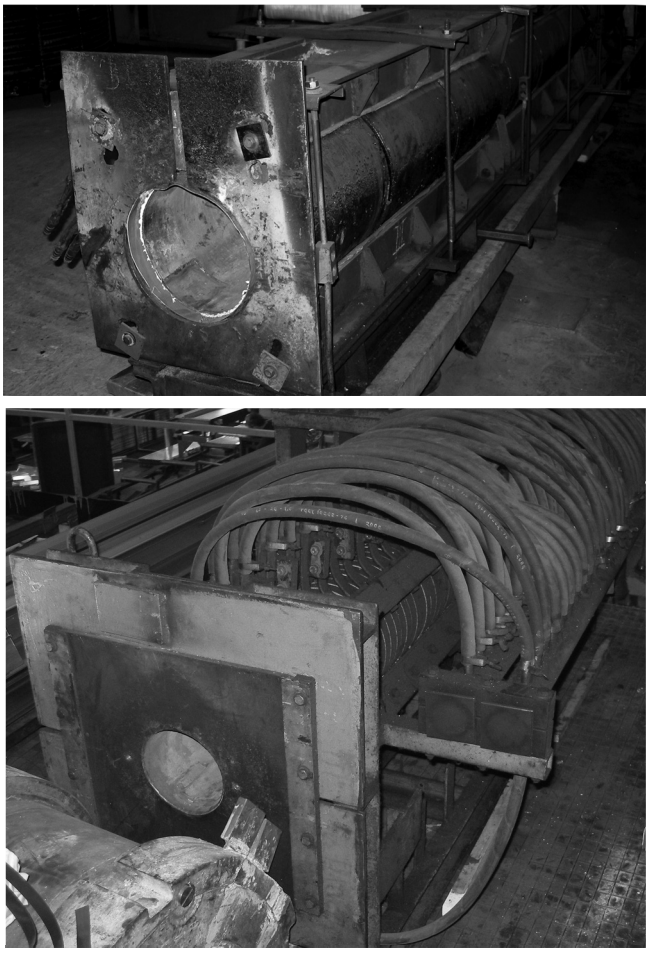


Рис. 1. Общий вид индукционных нагревателей разного типа

Fig. 1. Types of induction heaters

конденсаторов, на линейном напряжении U_{ca}. Такая батарея предназначена для поддержания резистивного сопротивления силовой ветви путем создания резонанса токов [9]. В ходе симметрирования на начальные параметры индуктора дрейф импеданса не учитывают.

В моделируемом устройстве использованы штатные регуляторы емкости конденсаторных батарей и индуктивности дросселя. Переключение выполняют вентильными ключами, работающими под управлением контроллера [5, 10]. Традиционные дискретные регуляторы обычно построены с применением тиристоров или симисторов. Моделирование подобных элементов в произвольном симуляторе, как правило, затруднений не вызывает.

Согласно схеме рис. 2, элемент R_{ID} представляет собой резистивный двухполюсник с переменными параметрами. Моделирование силовых индукционных устройств с регулируемыми резистивными элементами содержит определенные сложности. Аналоговое регулирование двухполюсных элементов в численном эксперименте не представляется возможным. Поэтому для моделирования параметрического двухполюсника следует использовать дискретное управление с применением идеализированных ключей. Характеристики дискретного управления

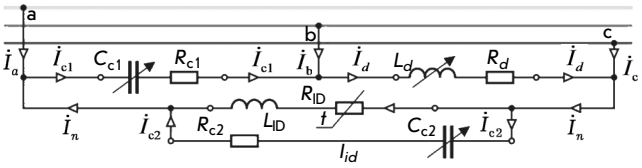


Рис. 2. Схема индукционной установки с параметрическими моделями

Fig. 2. Induction device with parametric models

могут быть различными. В простейшем случае можно применить двоичный код.

Динамическое управление двухполюсниками имеет ряд особенностей, которые в полной мере проявляются во временной области. Определенные затруднения возникают при оптимизации интервалов переключения, поскольку при моделировании применяются вычислительные методы, критичные к выбору шага. Помимо моделирования динамических режимов, применение дискретно управляемых элементов позволяет автоматизировать численный эксперимент в области установившихся режимов. Используя функции импульсного управления переключаемыми моделями, можно запрограммировать многовариантные исследования совокупности квазистационарных состояний модели системы электропитания индукционного комплекса.

В численном эксперименте должна быть учтена зависимость сопротивления (проводимости) от температуры. Вместе с тем температура элемента изменяется существенно медленнее, нежели длится переходный режим. Указанная особенность позволяет преодолеть затруднения с выбором интервалов переключения. Тем не менее именно параметрический характер двухполюсника позволяет говорить об импульсном управлении, поскольку фактически импеданс изменяется во времени. Таким образом, на этапе моделирования в симуляторе двухполюсник подлежит замене параметрической моделью. Степень сложности структуры параметрической модели определяется уровнем соответствия синтезируемой характеристики управления условиям регулирования кривой изменения режимных параметров [6, 11]. Характеристики изменения импеданса параметрического двухполюсника во времени имеют монотонный характер. Диапазон изменения импеданса не превышает 20 % от номинального значения. При моделировании силовых цепей индукционных комплексов применяют модели, созданные из элементов с сосредоточенными параметрами. Таким образом, исследуемые модели становятся цифро-аналоговыми. Для изменения параметров двухполюсных элементов можно использовать кодовое импульсное управление [11, 12]. Состояние электрического ключа каждого коммутируемого элемента модели определяется двоичным кодом. При этом в импульсных параметрических моделях можно применить разные схемы соединения элементов с некоторым числом идеальных ключей. Обычно количество ключей соответствует количеству разрядов регулируемой модели [11, 13].

При малых временных интервалах переключения $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ модель соответствует параметрическому устройству. Если временные интервалы превышают значения постоянных времени, то модель используют в области стационарных режимов. Низкая частота коммутации обеспечивает расчет совокупности квазистационарных режимов индукционной нагрузки. Для моделирования переходных режимов обеспечивают выбор весьма малых интервалов времени между коммутациями [4, 14]. Такую задачу решают при условии преодоления конфликтов между размером шага дискретизации по времени и интервалами переключения ключей. В применяемом программном обеспечении указанная проблема решается автоматически, на алгоритмическом уровне. Это повышает сложность программного кода, однако исключает сбои в ходе численного эксперимента.

Пример простейших импульсных резистивных регуляторов последовательной и параллельной структуры показан на рис. 3 *а, б*. Регулируемые элементы возможно идентифицировать в Z-области как резисторы R, а также в Y-области как проводимости G. Необходимо заметить, что в большинстве практических схемотехнических решений, особенно с учетом применения вычислительных алгоритмов узлового анализа, представление проводимостью оказывается предпочтительнее.

На рисунках приняты следующие обозначения: R_1 – базовый номинал резистора, S_1 – идеальный управляемый ключ, тогда $k_з = t_и/T$ – коэффициент заполнения импульсов для управляющей последовательности, показанной на рис. 3 *в*.

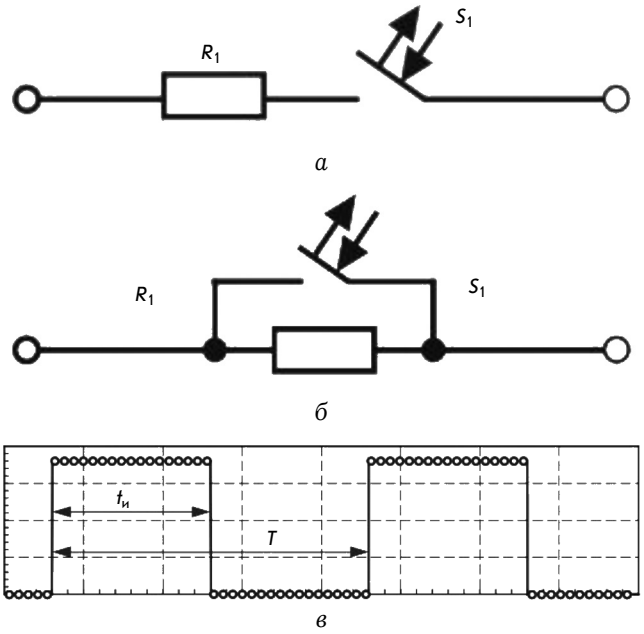


Рис. 3. Фрагменты схемотехники импульсных регуляторов:

а – модель последовательной коммутации;
б – модель параллельной коммутации;
в – управляющая закономерность импульсных моделей

Fig. 3. Parts of pulse regulator circuit design:

a – series connection;
b – parallel connection;
c – control pattern for pulse models

На базе линейных резистивных двухполюсников создают более сложные схемные модели управляемых элементов. При помощи импульсного воздействия можно реализовать как линейные, так и нелинейные переходные характеристики. Несомненным достоинством подобных моделей можно считать линейность их параметров и сравнительно невысокий порядок матричных уравнений, получаемых в узловом базисе. Использование таких моделей предпочтительно в совокупности с типовыми многополюсниками теории цепей, именуемыми управляемыми источниками напряжения и тока [15, 16].

Динамическое состояние ветви с импульсно регулируемой проводимостью может быть описано выражением:

$$g(t, k_з) = \begin{cases} G, \text{ if: } nT \le t \le [T + t_и]; \\ 0, \text{ if: } [nT + t_и] < (n+1)T, \end{cases} \quad (1)$$

где $n = 1, 2, 3, ..., \infty$

Применяя разложение в тригонометрический ряд, для симметричной относительно середины интервала переключения функции $g(t, k)$, можно переписать выражение динамической проводимости резистивного звена в виде суммы постоянной и переменной составляющих:

$$g(t, k_з) = g(k_з) + \tilde{g}(t, k_з) = G k_з + \frac{2G}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi k_з}{n} \cos \frac{2n\pi}{T} t. \quad (2)$$

В случае применения двоичного кода управления, удобно использовать весовой коэффициент для регулируемой матрицы, согласно рис. 4 *а, б*, равный двум $k = R_{n+1}/R_n = 2$. Пример импульсно управляемых резистивных элементов более сложной, параллельной и последовательной структуры показан на рис. 4 *а, б*.

В принятых на рис. 4 обозначениях R_n – номиналы регулируемых резисторов матрицы, принятые с

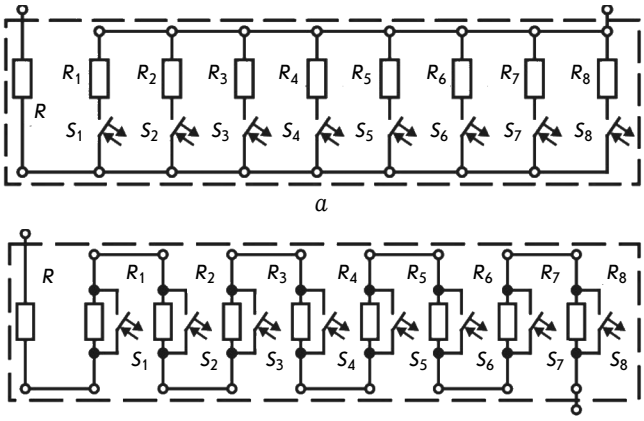


Рис. 4. Варианты моделей регулятора:

а – параллельного;
б – последовательного

Fig. 4. Controller options:

a – parallel;
b – series

заданным весовым коэффициентом. Параллельно каждому переключаемому элементу может быть установлена усредняющая емкость [11, 14]. При этом снижается модулирующее влияние ступенчатого процесса и соответственно уменьшается интенсивность высших гармоник напряжения и тока, обусловленных переключением. Величину усредняющей емкости выбирают из условия минимально возможной инерционности импульсного звена.

Характеристики двоичного кодового управления резистивными ключами пятиразрядной параметрической модели показаны на рис. 5. В общем случае количество разрядов может быть увеличено. Однако нужно понимать, что при построении моделей 8-, 16- или 24-разрядных управляемых элементов может потребоваться увеличение разрядности математического ядра используемого вычислителя [16, 17]. Это обусловлено не столько условием расширения полосы пропускания моделируемого индукционного устройства с импульсно управляемыми элементами, сколько обеспечением условий сходимости итерационного вычислительного процесса.

Кстати, можно заметить, что, согласно приближенной оценке, для расширения сигнальной полосы выше 10 Гц частоту управляющих импульсов переходного режима следует выбирать значением больше 10 кГц [11]. Поэтому для управления элементами в промышленных установках коммутацию моделей выполняют на частоте более 50 кГц. При этом погрешность установки значения сопротивления при импульсном регулировании пятиразрядной резистивной матрицы определяется отношением номинала младшего разряда к старшему: $\varepsilon_R = R_1/R_5 = 6{,}25$ %. Для достижения большей точности в резистивных аналого-цифровых моделях предпочтительно оперировать восьмиразрядными матричными конструкциями, для которых выполняется равенство:

$$\varepsilon_R^{н} = R_1/R_8 = 2/256 = 0{,}78\ \%. \qquad (3)$$

Характеристика с импульсными последовательностями управления ключами S_1–S_5 без задержки в нулевой момент времени показана на рис. 5 *а*. Характеристика управления ключами с задержкой в нулевой момент времени приведена на рис. 5 *б*. В рассматриваемом контексте качество электронных ключей, для которых, как правило, используют MOSFET-компоненты, здесь не обсуждается. Ключи считаются идеальными. Моменты переключения на графиках обозначены соответствующими буквами [t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6], коммутация ключа происходит мгновенно [16, 18].

Настройку параметрических моделей выполняют с применением схемотехники стандартных источников тока *J* и ЭДС *E*. Примеры схемных конструкций для диагностики регулировочных параметров в области токов и напряжений представлены на рис. 6. Простейший контур с источником тока *J*, показанный на рис. 6 *а*, предназначен для диагностики мгновенного напряжения на импульсной резистивной модели относительно узла с нулевым потенциалом.

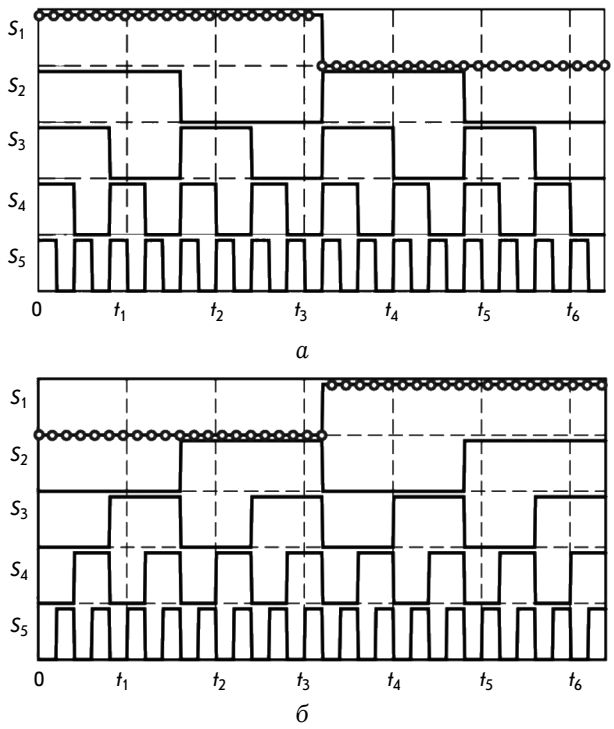


Рис. 5. Характеристики управления ключами параметрической модели:
а — без задержки в нулевой момент времени;
б — с задержкой в нулевой момент времени

Fig. 5. Switch control characteristics of the parametric model:
a — no initial time delay;
b — with an initial time delay

При подаче управляющих импульсов по рис. 5 *а* на ключи S_n внутри модели $R(t)$ мгновенный ток $i(t)$ модели принимает значения, изменяющиеся во времени, согласно рис. 7.

На схемах приняты следующие обозначения: *J*, *E* – источники постоянного тока и ЭДС, $R(t)$ – резистивная модель, управляемая во времени, Out – датчик мгновенного напряжения в узле цепи, *EI* – источник напряжения, управляемый током (ИНУТ). На схеме рис. 6 *б* контролируют уже изменение тока во времени. Управляемый источник *EI* преобразует мгновенный ток первичной короткозамкнутой ветви в выходное напряжение, измеряемое датчиком Out. Коэффициент передачи *EI* равен единице, поэтому выходное напряжение фактически отражает характеристику изменения тока первичной ветви [18–20].

Расчет схем с параметрическим элементами и управляемыми источниками традиционными для электротехники методами, например по законам Кирхгофа, затруднителен. Поэтому предпочтительно применение вычислений в программной среде моделирования с использованием типового описания всех элементов [16, 20, 21]. Фактически построение схемных моделей соответствует проведению численного эксперимента. Модель создают в определенной последовательности, в соответствии с заранее продуманной программой эксперимента. Описание модели формируют с применением языка моделирования, аналогичного некоторым версиям программной среды Ansys.

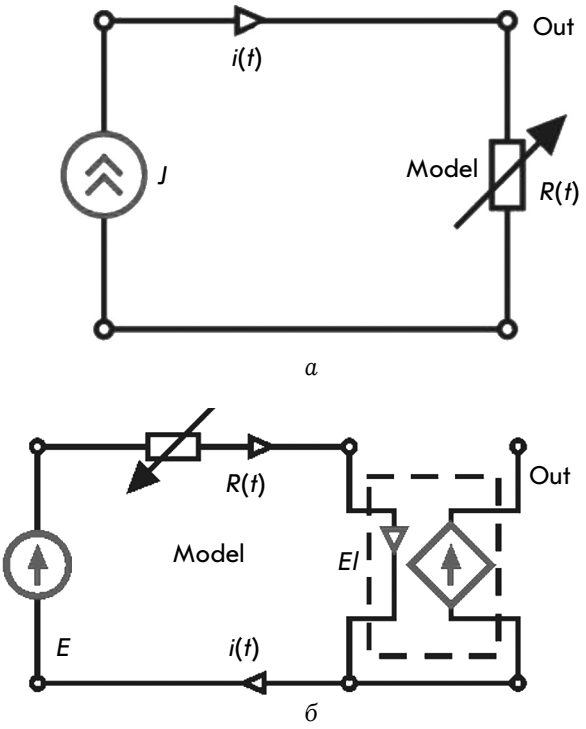


Рис. 6. Тестовые схемы для настройки параметрических моделей:
а – схема тестирования источником тока;
б – схема тестирования источником ЭДС

Fig. 6. Testing circuits for adjusting parametric models:
a – current source testing;
b – EMF source testing

Фрагменты матричного описания источников ЭДС и тока показаны ниже. Ток источника направлен от узла m к узлу n, напряжение направлено навстречу.

$$E_k = V_n - V_m = U,$$

$$\begin{array}{c} \\ m \\ n \\ i_E \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} m & n & i_E \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array}\begin{bmatrix} V_m \\ V_n \\ i_E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_k \end{bmatrix}. \qquad (4)$$

При формировании системы модифицированных узловых уравнений для небольших схем используют приведенный ниже штамп источника тока, полученный по компонентному уравнению Z-ветви.

$$J_k = I,$$

$$\begin{array}{c} \\ m \\ n \\ i_J \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} m & n & i_J \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}\begin{bmatrix} V_m \\ V_n \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_k \end{bmatrix}. \qquad (5)$$

Рассмотрим описание математических моделей, применяемых для построения алгоритма анализа цепей с управляемым источником ЭДС [17, 18, 22]. Входной ток направлен от узла i к узлу j, входное напряжение равно нулю, выходное напряжение направлено от узла m к узлу n против источника, выходной ток и источник ЭДС направлен от узла n к узлу m. Матричное описание управляемого источника ИНУТ формируют на основе компонентных уравнений, которые имеют вид:

$$u_2(t) = k_R \cdot i_1(t),\ V_n(t) - V_m(t) = k_R \cdot i_1(t);$$

$$V_m(t) - V_n(t) + k_R \cdot i_1(t) = 0, \quad V_j(t) - V_i(t) = 0,$$

где $u_2(t)$ – выходное напряжение источника;
$i_1(t)$ – входной ток источника;
$k = R_П$ – коэффициент передачи (переходное сопротивление);
$V(t)$ – потенциалы узлов.

Представленная ниже модифицированная система узловых уравнений для управляемого источника составлена с учетом управляющей и управляемой ветвей.

$$\begin{array}{c} \\ i \\ j \\ n \\ m \\ i_1 \\ i_2 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} i & j & n & m & i_1 & i_2 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & k_R & 0 \end{bmatrix} \end{array}\begin{bmatrix} V_i(t) \\ V_j(t) \\ V_n(t) \\ V_m(t) \\ i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \qquad (6)$$

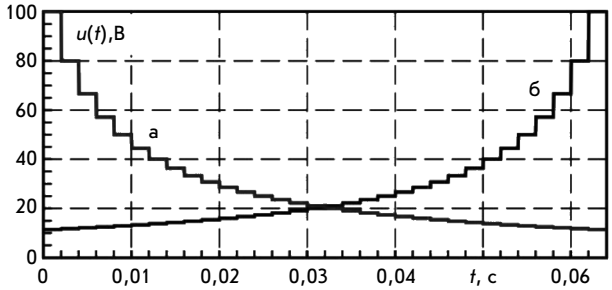
Приведенные соотношения автоматически интегрируются в выражение основного вычислительного метода. В программной среде математического моделирования индукционных устройств запрограммирован модифицированный узловой анализ [16–18]. Обобщенное выражение вычислительного метода, конвертированное во временную область, приведено ниже:

$$\left[\begin{array}{c|c} \begin{bmatrix} g_{11} & & \cdots \\ & \cdots & \\ \cdots & & g_{kk} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} b_{kk+1} & & \cdots \\ & \cdots & \\ \cdots & & b_{nn} \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} a_{11} & & \cdots \\ & \cdots & \\ \cdots & & a_{kk} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} r_{kk+1} & & \cdots \\ & \cdots & \\ \cdots & & r_{nn} \end{bmatrix} \end{array}\right] \times$$

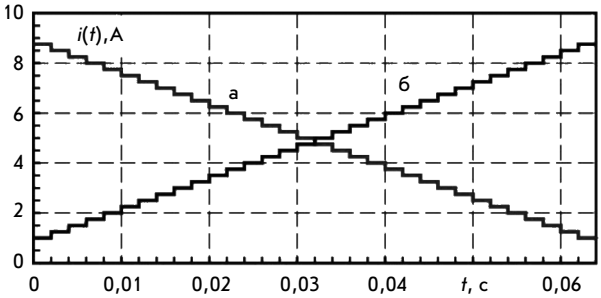
$$\times \left[\begin{array}{c} \begin{bmatrix} V_1^g(t) \\ \cdots \\ V_k^g(t) \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} i_1^r(t) \\ \cdots \\ i_n^r(t) \end{bmatrix} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} \begin{bmatrix} \cdots \\ \sum j_k^g(t) \\ \cdots \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} \cdots \\ \sum e_n^r(t) \\ \cdots \end{bmatrix} \end{array}\right], \qquad (7)$$

где $[g_{kk}]$ – матрица узловых проводимостей регулярной части цепи;
$[r_{nn}]$ – матрица сопротивлений;
$[a_{kk}]$, $[b_{nn}]$ – матрицы с единичными и нулевыми коэффициентами, учитывающие управляемые элементы;
$[\Sigma_{jk}]$ – матрица узловых токов;
$[\Sigma_{en}]$ – матричный массив источников ЭДС.

Характеристики регулируемых режимных параметров, соответствующие кодовому двоичному управлению пятиразрядной резистивной модели, показаны на рис. 7. Судя по характеристикам рис. 7 *а, б*, ступенчатое изменение режимных параметров модулировано частотой переключения. Наименьший размер ступеньки характерен для работы ключа S_5 младшего разряда. Совокупность коммутаций ключей в каждый момент времени определяет мгновенное значение регулируемой функции без усреднения [11, 23].



а



б

Рис. 7. Динамика изменения режимных параметров резистивной модели:
а — напряжение;
б — ток

Fig. 7. Dynamics of mode parameters of the resistance model:
a — voltage;
b — current

Графики с нелинейными зависимостями параметров (рис. 7 *а*) соответствуют напряжению. Графики с линейными характеристиками (рис. 7 *б*) соответствуют току. И напряжения, и токи определяются одними и теми же импульсными управляющими последовательностями (рис. 5 *а, б*). В зависимости от поставленной задачи моделирования можно рекомендовать применять комбинированное включение моделей по рис. 4 *а, б*. Причем для моделирования нелинейных кривых удобно применять инвертирование характеристик с применением источников напряжения, управляемых напряжением (ИНУН), и источников тока, управляемых током (ИТУТ). Такие источники сравнительно простым способом обеспечивают режим гальванической развязки разных частей схемы [11, 14, 24].

С учетом возможностей параметрических моделей можно перейти к анализу переходных режимов индукционных комплексов с учетом переключения конденсаторных батарей и сравнительно простых резистивных моделей индуктора. Показанные особенности регулировочных характеристик (рис. 7) требуют отдельного исследования для этапа построения более сложных последовательно-параллельных моделей. Кроме того, дополнительной проработки требуют вопросы выбора диапазонов регулирования параметрических моделей резистивных двухполюсников, а также построения методики синтеза управляемых элементов.

Пример векторной диаграммы индукционной установки для нагрева алюминиевых столбов показан на рис. 8. Расчет и моделирование режимов выполнены с применением переключаемых моделей. С учетом глубины изменения нагрузки регулировочные характеристики приобретают более сложный вид [25, 26].

По диаграмме видно, что симметрирование электромагнитного режима схемой Штейнмеца эффективно только при поддержании резистивного характера нагрузки. Ухудшение коэффициента мощности индуктора с выходом из режима резонанса немедленно приводит к искажению симметрии, сопровождаемому расхождением векторов токов. Именно поэтому на практике необходимы точное измерительное оборудование и управляющее микроконтроллерное устройство, автоматически регулирующее электромагнитное состояние индукционной установки. Существенное изменение положения векторов на диаграмме характерно для возможного несогласованного изменения параметров симметрирующих устройств при допустимости одновременного дрейфа электрофизических параметров нагруженного индуктора.

При построении векторной диаграммы использованы результаты моделирования режимов для глубины регулирования индукционной нагрузки в 15 %. Кроме того, в программе численного эксперимента задан расширенный до ±25 % относительно симметричного режима диапазон регулирования каждого из симметрирующих элементов. Можно заметить, что практическое совпадение заданных здесь условий маловероятно. Тем не менее векторная диаграмма наглядно отображает границы возможных значений токов индуктора (3–4 кА). Естественно, что токи потребления из сети при столь глубоком рассогласовании выходят за допустимые границы, ограниченные резонансными характеристиками параллельного контура индуктора.

Возможности импульсного регулирования моделей могут быть использованы в расчете стационарного режима. Для этого необходимо составить программу численного эксперимента и описать последовательность моделирования в формате программного кода. Так формируют управляющий командный файл, позволяющий провести многовариантные расчеты по глобальному описанию индукционной установки. В результате получают совокупность режимных характеристик при изменении параметров нагрузки в ходе нагрева, отображенную в виде «веерных» векторных диаграмм. Задача моделирования динамики индукционных нагревателей

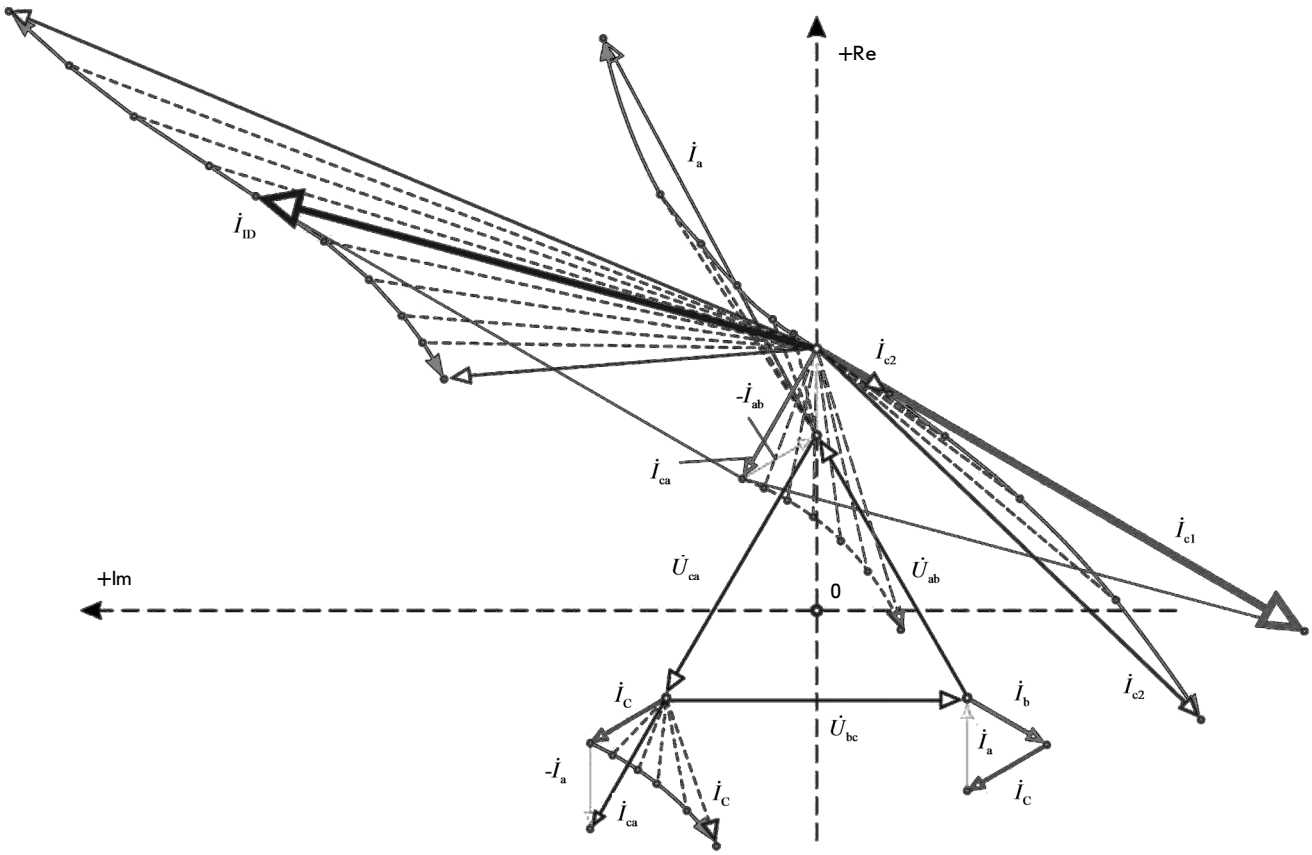


Рис. 8. Векторная диаграмма индукционной установки с переключаемыми моделями

Fig. 8. Vector diagram for an induction device with switching models

с построением фазовых траекторий и портретов для режимных характеристик [27] программируется аналогично задаче анализа векторных диаграмм [28]. Ввиду большого объема расчетов и громоздкости задачи, описанные фрагменты численного эксперимента выделены в обособленные проекты и будут рассмотрены отдельно.

Предложенные в статье параметрические модели резистивных двухполюсников могут быть использованы при исследовании режимов индукционных установок с изменяющимися параметрами. Импульсное управление параметрами резистивных звеньев в составе сложных RLC-моделей в численном эксперименте позволяет применить матричный математический аппарат и алгоритмы итерационного анализа аналоговых подсистем. При построении моделей широко используется элементный базис управляемых источников напряжения и тока, применительно к теории цепей. Использование симулятора позволяет исключить формирование и решение сложных систем уравнений, переходя непосредственно к понятной и очевидной схемотехнике моделируемой системы. При этом синтезируемые модели оказываются аналого-цифровыми, а структура получаемых характеристик управления может становиться нелинейной. При соответствующем выборе интервалов регулирования задача управления может быть как параметрической, так и стационарной. Дополнительные удобства предложенного подхода проявляются в виде возможности получения эволюционной совокупности векторных диаграмм для нескольких установившихся режимов моделируемой системы в ходе настройки моделей.

Литература

1. Алиферов А. И., Лупи С., Форзан М. Электротехнологические установки и системы. Установки индукционного нагрева. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – 160 с.

2. Данилушкин А. И., Животягин Д. А. Энергоэффективные режимы работы индукционных нагревателей в технологической линии обработки металла / / Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции. – Курск, 2018.

3. Kinev, E. S., Tyapin, A. A., Litovchenko, A. V., Efimov, S. N., Bezhitskiy, S. S. (2020). Energy modes of a three-section inductor for heating aluminum. *Journal of Physics: Conference Series,* 1679, 052048. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052048.

4. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Численный анализ режимов индукционной установки по параметрическим моделям / / Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Сборник докладов XII Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2020.

5. Kinev, E. S., Tyapin, A. A., Golovenko, E. A., Avdulov, A. A., Efimov, S. N. (2020). Universal MHD device for automation of casting control of aluminum. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 919, 032019. https://doi.org/10.1088/1757-899x/919/3/032019.

6. Базаров А. А., Павлова О. Е. Электротехнический комплекс для нагрева слитков с равномерным энергопотреблением / / Современное российское оборудование для повышения надежности, экономичности и безопасности энергетического комплекса России. Сборник научных трудов. – Самара, 2019.

7. Тяпин А. А., Кинев Е. С., Байкова К. А., Литовченко А. В. Моделирование энергетических характеристик индукционных нагревателей / / Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сборник научных статей VI международной научной конференции. – Ч. 1. – Казань, 2020.

8. Tyapin, A. A., Kinev, E. S. (2020). Application of the inductor modeling technique for designing a series of induction devices. *The Scientific Heritage,* 50-1, 61–65.

9. Tyapin, A. A., Kinev, E. S. (2020). Fundamentals of PWM Inverter Control Strategy of Linear Metallurgical MHD Machine. *The Scientific Heritage,* 51-1, 63–67.

10. Малышев И. В. Схемотехника импульсных и цифровых устройств. – Таганрог: ЮФУ, 2014. – 397 с.

11. Захаров В. К., Лыпарь Ю. И. Электронные устройства автоматики и телемеханики. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 432 с.

12. Тяпин А. А., Кинев Е. С. Методика моделирования и расчета режимов индукционных нагревателей / / Евразийское научное объединение. – № 8-2. – 2020. – С. 119–123.

13. Williams, B. W. (2006). *Principles and elements of power electronics. Devices, Drivers, Applications and Passive Components*. Glasgow.

14. Wilamowski, B. M., Irwin, J. D. (Eds.). (2011). *Power electronics and motor drives*. Taylor and Francis Group. https://doi.org/10.1201/9781315218410.

15. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 2005. – 583 с.

16. Чуа Л. О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.

17. Chua, L. O., Desoer, C. A., Kuh, E. S. Linear and nonlinear circuits. McGraw-Hill, New York, 1987.

18. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

19. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – М.: Мир, 1998. – 704 с.

20. Бычков Ю. А., Золотницкий В. М., Чернышев Э. П., Белянин А. Н. Основы теоретической электротехники. – СПб.: Лань, 2008. – 592 с.

21. Карпов Е. А., Тимофеев В. Н., Перфильев Ю. С., Хацаюк М. Ю., Первухин М. В. Моделирование переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях. – Красноярск: СФУ, 2019. – 189 с.

22. Карпов Е. А., Тимофеев В. Н., Хацаюк М. Ю. Теоретические основы электротехники. Основы нелинейной электротехники в упражнениях и задачах. – Красноярск: СФУ, 2017. – 181 с.

23. Shaffer, R. (2007). *Fundamentals of power electronics with MATLAB*. Charles River Media, Boston, Massachusetts.

24. Kinev E., Tyapin A., Litovchenko A. (2020). Analysis of the closed circuit network in the power supply system of a metallurgical enterprise. *The Scientific Heritage*. 49-1, 69–74.

25. Kinev, E. S., Tyapin, A. A., Golovenko, E. A., Avdulov, A. A., Efimov, S. N. (2020). Universal MHD device for automation of casting control of aluminum. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 919, 032019. https://doi.org/10.1088/1757-899x/919/3/032019

26. Фризен В. Э., Назаров С. Л. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий. – Екатеринбург: УФУ, 2018. – 180 с.

27. Kinev, E., Tyapin, A. (2020). Three-phase inductor performance correction using local resonances. *The Scientific Heritage,* 48-1, 36–44.

28. Кинев Е. С., Тяпин А. А., Ефимов С. Н. Комбинированное включение обмоток при модернизации индукционного нагревателя / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – № 4. – С. 39–48. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-39-48.

Для цитирования:
Тяпин А. А., Пантелеев В. И., Кинев Е. С., Первухин М. В. Кодовое управление параметрическими моделями индукционных нагревателей / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 31–40. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-31-40.

Cite this paper:
Tyapin, A. A., Panteleev, V. I., Kinev, E. S., Pervukhin, M. V. (2021). Code control of parametric models of induction heaters. *Energy Safety and Energy Economy*, 3, 31–40 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-31-40.

Code control for parametric models of induction heaters

A. A. Tyapin,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

V. I. Panteleev,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, Doctor of Science, professor

E. S. Kinev,
LLC Thermal electrical systems, Krasnoyarsk, Russia, director, PhD

M. V. Pervukhin,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, Doctor of Science, associate professor

In this paper, we describe our approach to building controllable models of induction heaters. Parameters of equivalent circuits of aluminum heating inductors include certain components tied to secondary elements. As long as metal properties are subject to change during the heating process, resistive and reactive parts of equivalent circuits should be taken into account. Adjustable resistive components have rarely been used in circuit models. To control equivalent resistive two-terminal parts, we offer pulse code control of impedance-changing switches. Controlling switching time in models with series, parallel, and mixed connection provides required softness of resistive conductivity change. Control characteristics of current and voltage were obtained with use of a simulator. As the result of our numerical experiment, the set of operating parameters for an induction device was determined.

Keywords: *induction device, induction heating, mathematical modeling, parametric model, pulse code control.*

References

1. Aliferov, A. I., Lupi, S., Forzan, M. (2017). *Elektrotekhnologicheskie ustanovki i sistemy. Ustanovki induktsionnogo nagreva* [Electrical engineering installations and systems. Induction heating installations]. Novosibirsk State Technical University.

2. Danilushkin, A. I., Zhivotyagin, D. A. (2018). Energoeffektivnye rezhimy raboty induktsionnykh nagrevatelei v tekhnologicheskoi linii obrabotki metalla [Energy efficient operation modes of induction heaters in a metal production line]. *Prospects for Processing Technologies and Equipment Development in Mechanical Engineering. Proc. of 3rd Russian Scientific and Technical Conference*, Kursk, pp. 82–85.

3. Kinev, E. S., Tyapin, A. A., Litovchenko, A. V., Efimov, S. N., Bezhitskiy, S. S. (2020). Energy modes of a three-section inductor for heating aluminum. *Journal of Physics: Conference Series*, 1679, 052048. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052048.

4. Tyapin, A. A., Kinev, E. S. Chislenny analiz rezhimov induktsionnoy ustanovki po parametricheskim modelyam [Numerical analysis of induction plant modes using parametric models]. *ITEE-2020*. Cheboksary, Chuvash State University, pp. 107–111.

5. Kinev, E. S., Tyapin, A. A., Golovenko, E. A., Avdulov, A. A., Efimov, S. N. (2020). Universal MHD device for automation of casting control of aluminum. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 919, 032019. https://doi.org/10.1088/1757-899x/919/3/032019.

6. Bazarov, A. A., Pavlova, O. E. (2019). Elektrotekhnicheskiy kompleks dlya nagreva slitkov s ravnomernym energopotrebleniem [Electrical engineering complex for ingot melting with even energy consumption]. *Modern Russian Equipment for Improving the Reliability, Efficiency and Safety of the Russian Energy Complex*. Samara, pp. 6–9.

7. Tyapin, A. A., Kinev, E. S., Baykova, K. A., Litovchenko, A. V. (2020). Modelirovanie energeticheskikh kharakteristik induktsionnykh nagrevateley [Simulation of energy parameters of induction heaters]. *Priority directions of innovation activity in industry. Proc. of the 6th International Scientific Conference*, 2020, pt. 1, Kazan, pp. 83–88.

8. Tyapin, A. A., Kinev, E. S. (2020). Application of the inductor modeling technique for designing a series of induction devices. *The Scientific Heritage,* 50-1, 61–65.

9. Tyapin, A. A., Kinev, E. S. (2020). Fundamentals of PWM Inverter Control Strategy of Linear Metallurgical MHD Machine. *The Scientific Heritage,* 51-1, 63–67.

10. Malyshev, I. V. (2014). *Skhemotekhnika impulsnykh i tsifrovykh ustroystv* [Pulse and digital device schemes]. Taganrog, Southern Federal University.

11. Zakharov, V. K., Lypar, Yu. I. (1984). *Elektronnye ustroystva avtomatiki i telemekhaniki* [Electronic devices for automation and telemetry]. Leningrad, Energoatomizdat.

12. Tyapin, A. A., Kinev, E. S. (2020). Metodika modelirovaniya i rascheta rezhimov induktsionnykh nagrevateley [Modeling and calculation methods the modes of induction heaters]. *Eurasian Scientific Association,* 8, 2, 119–123.

13. Williams, B. W. (2006). *Principles and elements of power electronics. Devices, Drivers, Applications and Passive Components*. Glasgow.

14. Wilamowski, B. M., Irwin, J. D. (Eds.). (2011). *Power electronics and motor drives*. Taylor and Francis Group. https://doi.org/10.1201/9781315218410.

15. Baskakov, S. I. (2005). *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio circuits and signals]. Moscow, Vysshaya shkola.

16. Chua, L. O., Lin Pen-Min. (1980). *Mashinny analiz elektronnykh skhem: algoritmy i vychislitelnye metody* [Machine analysis of electronic circuits: Algorithms and computational methods]. Moscow, Energia.

17. Chua, L. O., Desoer, C. A., Kuh, E. S. Linear and nonlinear circuits. McGraw-Hill, New York, 1987.

18. Zeveke, G. V. Ionkin, P. A., Netushil, A. V., Strakhov, S. V. (1989). *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuits]. Moscow, Energoatomizdat.

19. Horowitz, P., Hill, W. (1998). *Iskusstvo skhemotekhniki* [The Art of Electronics]. Moscow, Mir.

20. Bychkov, Yu. A., Zolotnitsky, V. M., Chernyshev, E. P., Belyanin, A. N. (2008). *Osnovy teoreticheskoy elektrotekhniki* [Fundamentals of theoretical electrical engineering]. St. Petersburg.

21. Karpov, E. A., Timofeev, V. N., Perfiliev, Yu. S., Khatsayuk, M. Yu., Pervukhin, M. V. (2019). *Modelirovanie perekhodnykh protsessov v lineynykh i nelineynykh elektricheskikh tsepyakh* [Simulation of transient processes in linear and nonlinear electric circuits] Krasnoyarsk, Siberian Federal University.

22. Karpov, E. A., Timofeev, V. N., Khatsayuk, M. Yu. (2017). *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Osnovy nelineynoy elektrotekhniki v uprazhneniyakh i zadachakh* [Theoretical fundamentals of electrical engineering]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University.

23. Shaffer, R. (2007). *Fundamentals of Power Electronics with MATLAB*. Charles River Media, Boston, Massachusetts.

24. Kinev E., Tyapin A., Litovchenko A. (2020). Analysis of the closed circuit network in the power supply system of a metallurgical enterprise. *The Scientific Heritage*. 49-1, 69–74.

25. Kinev, E. S., Tyapin, A. A., Golovenko, E. A., Avdulov, A. A., Efimov, S. N. (2020). Universal MHD device for automation of casting control of aluminum. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 919, 032019. https://doi.org/10.1088/1757-899x/919/3/032019

26. Frizen, V. E., Nazarov, S. L. *Raschyot i vybor elektrooborudovaniya nizkovoltnykh raspredelitelnykh setey promyshlennykh predpriyatiy* [Calculation and selection of electrical equipment for low voltage distribution grids of industrial companies]. Ekaterinburg, Ural Federal University, 2018.

27. Kinev, E., Tyapin, A. (2020). Three-phase inductor performance correction using local resonances. *The Scientific Heritage,* 48-1, 36–44.

28. Kinev, E. S., Tyapin, A. A., Efimov, S. N. (2020). Kombinirovannoe vklyuchenie obmotok pri modernizatsii induktsionnogo nagrevatelya [Combined winding coupling during induction heater upgrading]. *Energy Safety and Energy Economy,* 4, 39–48. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-39-48.

УДК 631.3.021 DOI 10.18635/2071-2219-2021-3-41-45

Оптимизация параметров и режимов работы биогазовой установки для достижения максимального выхода биометана

А. Г. Фиапшев,
Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, г. Нальчик, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий», кандидат технических наук, доцент

М. М. Хамоков,
Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, г. Нальчик, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий», кандидат технических наук, доцент

О. Х. Кильчукова,
Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, г. Нальчик, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий», кандидат технических наук, доцент

Б. Б. Темукуев,
Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, г. Нальчик, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий», кандидат технических наук, доцент

Б. А. Фиапшев,
Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, г. Нальчик

Представлены результаты теоретического исследования процесса анаэробной ферментации отходов животноводства, обоснованы конструктивно-технологическая схема и режимы работы биометановой установки. Установлено влияние температуры протекания процесса сбраживания субстрата, времени перемешивания субстрата и числа оборотов теплообменника-мешалки биометановой установки на выход биогаза. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальной проверкой на физической модели и лабораторной установке.

Ключевые слова: *биогазовая установка, биометан, многофакторный эксперимент, анаэробное сбраживание.*

Биоэнергетические технологии основаны на сложных физических и биохимических процессах в органических веществах. Все звенья сельскохозяйственного производства, в том числе растениеводство и животноводство, характеризуются весьма низким коэффициентом использования химической энергии органических веществ [1–3]. В естественных условиях скорость метаногенеза, происходящего под влиянием содержащегося в биомассе сообщества анаэробных микроорганизмов, невысока. Для интенсификации процесса метаногенеза необходима оптимизация условий, при которых скорость ферментных реакций, участвующих в образовании метана, была бы максимальной.

Благоприятной для жизнедеятельности сообщества метанообразующих микроорганизмов считается среда, в которой концентрация сухого вещества находится на уровне 10–12 %. В этом случае вязкость субстрата позволяет свободно перемещаться жидкости с находящимися в ней взвешенными твердыми частицами навозной биомассы и микробными клетками, а также пузырьками газа.

В биогазовых установках, где в качестве ферментируемой биомассы используется куриный помет, потенциальная токсичность, возникающая вследствие повышенного содержания аммиака в питательной среде, устраняется путем добавления измельченной биомассы с высоким содержанием углерода и высоким соотношением C:N. Лучшим ингредиентом для оптимизации содержания углерода и азота в питательной среде в подобной ситуации является солома. Солома и другие грубые корма, скармливаемые жвачным животным, обусловливают повышенное содержание в навозе крупного рогатого скота лигнина, который практически не поддается ферментативному разложению и не может участвовать в образовании газа. Имеющиеся приемы физико-химического и механического воздействия повышают доступность лиг-

нина для ферментативного разложения, однако это значительно увеличивает себестоимость производимого биометана [2].

Совершенствовать биотехнологию производства газа с высоким содержанием метана и оптимизировать параметры различных мощностей для работы в разных регионах позволит создание экспериментальной биометановой установки, работающей при термофильном режиме с включением в технологическую цепь этапа предварительной подготовки навозной биомассы (измельчение, химическая обработка, 8–12-часовое выдерживание биомассы для поглощения содержащегося в ней кислорода и создания благоприятных условий для жизнедеятельности кислото- и метаногенной микрофлоры), получение жидких и твердых удобрений и других продуктов безотходной технологии [4, 5].

Анаэробная ферментация навозной биомассы сопровождается уменьшением в шламе почти на 50 % количества сухого органического вещества по сравнению с его первоначальным уровнем в реакторе за счет включения 10–15 % углерода субстрата в микробную биомассу, а также в такие компоненты биометана, как метан и диоксид углерода. В шламе содержится углерода меньше, чем в исходном субстрате. Присутствие калия и фосфора придает шламу свойство высококачественного органического удобрения, в котором питательные вещества представлены в более доступной для растений форме. Внесение в почву шлама, лишенного специфического запаха, присущего переработанному навозу, не встречает препятствий и с экологической точки зрения. Перебродившая жидкость, как и перебродивший субстрат (шлам), не имеет неприятного запаха. Эта жидкость содержит органических веществ на 80 % меньше, а ее биологическая потребность в кислороде на 80 % ниже, чем до анаэробной ферментации.

На кафедре энергообеспечения предприятий Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета с 2012 г. проводятся теоретические и экспериментальные исследования по проектированию и изготовлению биометановой установки невысокой стоимости, предназначенной для небольших сельскохозяйственных предприятий (фермерских хозяйств, предпринимателей, частных подворий). При этом была поставлена задача разработки высокопроизводительной, высокоэффективной, простой в эксплуатации и надежной установки.

Результаты проведенных исследований позволили спроектировать и изготовить экспериментальную биогазовую установку с объемом метантенка 3,5 м^3, работающего при термофильном режиме анаэробного сбраживания, в котором перемешивающее и нагревательное устройства объединены в один узел – теплообменник-мешалку. Такое техническое решение позволяет нагревать всю массу субстрата за счет вращения теплообменника-мешалки [6].

Для определения оптимальных параметров установки были проведены экспериментальные исследования, составлена матрица их планирования, определены критерии эффективности работы и факторы, влияющие на них.

Для проведения исследований, планирования эксперимента и составления матрицы принято количество опытов, равное 15, при количестве факторов, равном 3 (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Матрица планирования эксперимента
Matrix of experiment planning

i	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	Y_i
1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	Y_1
2	1	1	−1	0	1	1	0	−1	0	0	Y_2
3	1	−1	1	0	1	1	0	−1	0	0	Y_3
4	1	−1	−1	0	1	1	0	1	0	0	Y_4
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y_5
6	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	Y_6
7	1	1	0	−1	1	0	1	0	−1	0	Y_7
8	1	−1	0	1	1	0	1	0	−1	0	Y_8
9	1	−1	0	−1	1	0	1	0	1	0	Y_9
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y_{10}
11	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	Y_{11}
12	1	0	1	−1	0	1	1	0	0	−1	Y_{12}
13	1	0	−1	1	0	1	1	0	0	−1	Y_{13}
14	1	0	−1	−1	0	1	1	0	0	1	Y_{14}
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Y_{15}

Для анализа полученных данных экспериментальных исследований использовалось программное обеспечение. Критерием оценки эффективности работы биометановой установки принят выход биометана.

Теоретические исследования работы биометановой установки показали, что на производительность по биометану оказывают влияние такие факторы, как температура протекания процесса сбраживания субстрата $T_с$, время перемешивания субстрата $t_п$ и число оборотов теплообменника-мешалки $n_т$ (табл. 2).

$$\begin{cases} \dfrac{dY_{Q_{БГ}}}{dt} = -0,6838 - 0,27X_1 - 0,7725X_3 - 2,5992X_1 = 0, \\ \dfrac{dY_{Q_{БГ}}}{dt} = 0,0925 - 0,27X_1 + 0,775X_3 - 2,0942X_2 = 0, \\ \dfrac{dY_{Q_{БГ}}}{dt} = -0,2888 - 0,7725X_1 + 0,775X_2 - 2,2392X_3. \end{cases} \quad (4)$$

В результате решения системы уравнений (4) определены оптимальные значения факторов в кодированном виде:

Таблица 2
Table 2

Факторы и уровни их варьирования
Factors and variation levels

Шаг и уровни варьирования факторов	Кодированное (безразмерное) значение факторов	Натуральное значение факторов		
		X_1 ($T_с$, град.)	X_2 ($t_п$, мин.)	X_3 ($n_т$, об/мин.)
Шаг	–	3	3	0,5
Верхний	+1	60	20	8
Нулевой	0	57	17	7,5
Нижний	–1	54	14	7

С целью определения оптимальных параметров и режимов работы биогазовой установки составлено уравнение регрессии:

$$Y_{Q_{БГ}} = 15,3967 - 0,6838X_1 + 0,0925X_2 - \\ -0,2888X_3 - 0,27X_1X_2 - 0,7725X_1X_3 + 0,775X_2X_3 - \\ -1,2996X_1^2 - 1,0471X_2^2 - 1,1196X_3^2. \quad (1)$$

Проверка адекватности по критерию Фишера показывает адекватность уравнения ($F_{расч}$ = 0,765 < < $F_{табл}$ = 2,359).

В раскодированном виде уравнение регрессии (1) имеет следующий вид:

$$Q_{БГ} = 15,3967 - 0,6838\left(\frac{T_п - 57}{3}\right) + 0,0925\left(\frac{t_п - 17}{3}\right) - \\ -0,2888\left(\frac{n_т - 7,5}{0,5}\right) - 0,27\left(\frac{T_п - 57}{3}\right)\left(\frac{t_п - 17}{3}\right) - \\ -0,7725\left(\frac{T_п - 57}{3}\right)\left(\frac{n_т - 7,5}{0,5}\right) + 0,775\left(\frac{t_п - 17}{3}\right)\left(\frac{n_т - 7,5}{0,5}\right) - \\ -1,2996\left(\frac{T_п - 57}{3}\right)^2 - 1,0471\left(\frac{t_п - 17}{3}\right)^2 - 1,1196\left(\frac{n_т - 7,5}{0,5}\right)^2. \quad (2)$$

После преобразований уравнение (2) примет вид:

$$Q_{БГ} = -905,8499 + 20,6062T_п + 1,8215t_п + \\ +87,1701n_т - 0,03T_пt_п - 0,515T_пn_т + 0,5167t_пn_т - \\ -0,1444T_п^2 - 0,1163t_п^2 - 4,4784n_т^2. \quad (3)$$

Для определения значения факторов для максимального выхода биометана была составлена система дифференциальных уравнений, представляющих частные производные по трем факторам:

$$X_1 = -0,2519;\ X_2 = 0,0014;\ X_3 = -0,0381.$$

Раскодированные значения факторов, при которых достигается максимальный выход биометана в объеме 15,5 м^3/сут., составляют:

температура протекания процесса сбраживания субстрата: 56,2 °С;

время перемешивания субстрата: 17 мин.;

число оборотов теплообменника-мешалки – 7,5 об/мин.

По критерию Кохрена произведена проверка воспроизводимости эксперимента:

$$G_{расч} = S^2(y_i)_{max} \Big/ \sum_{i=1}^{N} S^2(y_i) = 0,3003.$$

При 5 %-м уровне значимости f_1 = 2, f_2 = 15 табличное значение критерия Кохрена $G_{табл}$ = 0,335. Так как значение расчетного критерия Кохрена меньше табличного, то гипотеза об однородности дисперсий подтверждается.

Уравнение регрессии при нулевом уровне температуры протекания процесса сбраживания субстрата ($T_п$ = 57 °С) имеет вид:

$$Q_{БГ} = -200,4522 + 0,1115t_п + 57,8151n_т + \\ +0,5167t_пn_т - 0,1163t_п^2 - 4,4784n_т^2. \quad (5)$$

Поверхность отклика при данных характеристиках представлена на рис. 1.

Уравнение регрессии при нулевом уровне времени перемешивания субстрата ($t_п$ =17 мин.) имеет вид:

$$Q_{БГ} = -908,4952 + 20,0962T_п + 95,954n_т - \\ -0,515T_пn_т - 0,1444T_п^2 - 4,4784n_т^2. \quad (6)$$

Поверхность отклика при данных характеристиках представлена на рис. 2.

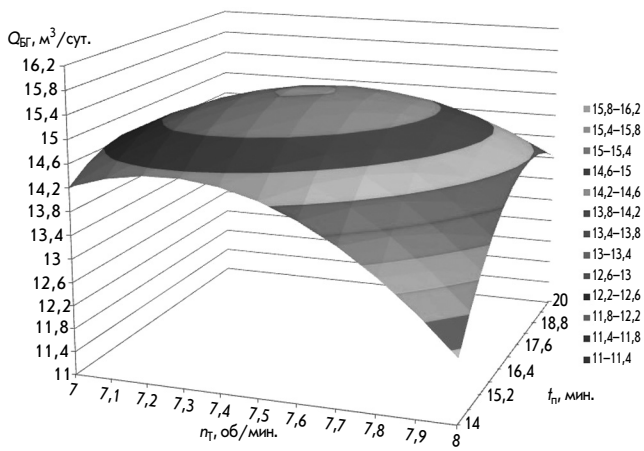


Рис. 1. Поверхность отклика $f(T_п, n_т)$ при нулевом уровне $T_п$ = 57 °С

Fig. 1. Response surface, $T_п$ = 57 °C

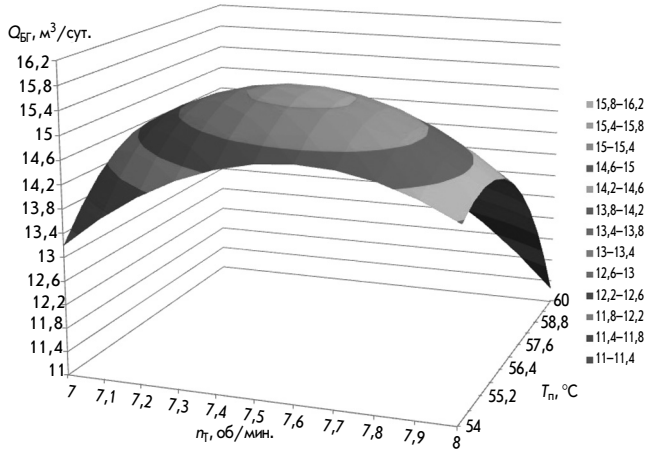


Рис. 2. Поверхность отклика при нулевом уровне $t_п$ = 17 мин.

Fig. 2. Response surface, $t_п$ = 17 min

Уравнение регрессии при нулевом уровне числа оборотов теплообменника-мешалки – $n_т$ = 7,5 об/мин., имеет вид:

$$Q_{БГ} = -503,9842 + 16,7737T_п + 5,6967t_п - \\ -0,03T_п t_п - 0,1444T_п^2 - 0,1163t_п^2. \quad (7)$$

Поверхность отклика при данных характеристиках представлена на рис. 3.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что максимальное значение критерия оптимизации (выход биометана в объеме 15,5 м³/сут.) достигается при значениях варьирующих факторов: температура протекания процесса сбраживания субстрата $T_п$ = 56,2 °С; время перемешивания субстрата $t_п$ = 17 мин.; число оборотов теплообменника-мешалки $n_т$ = 7,5 об/мин.

Проведенные исследования по планированию экспериментов и оптимизации режимов работы биометановой установки позволяют предложить потребителям (малым фермерским и сельхозпредприятиям) методику проектирования и изготовления широкого модельного ряда установок с учетом конкретной производительности. Учитывая результаты исследований существующих технологий и опыт

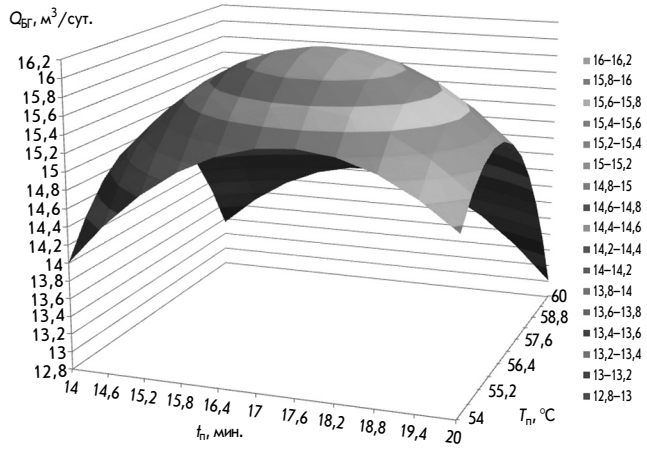


Рис. 3. Поверхность отклика при нулевом уровне $n_т$ = 7,5 об/мин.

Fig. 3. Response surface, $n_т$ = 7.5 rpm

зарубежных стран в производстве биометана, разработанная в Кабардино-Балкарском государственном аграрном университете биометановая установка может быть рекомендована к внедрению с доведением ее до промышленной эксплуатации в ходе строительства.

Литература

1. Барагунов А. Б. Предложения по совершенствованию технологии производства продукции молочного животноводства в горных условиях Северо-Кавказского федерального округа / / Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 4. – С. 35–42.

2. Апажев А. К. Основные направления реализации политики энергосбережения и повышения энергоэффективности / / Энергосбережение и энергоэффективность: проблемы и решения. Сборник научных трудов IX Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Нальчик, 2020.

3. Апажев А. К. Основные направления комплексной механизации сельскохозяйственного производства / / Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты. Сборник научных трудов. – Кинель, 2021.

4. Baragunov, A. B., Savvateeva, I. A., Kushaev, S. H., Kumakhov, A. A., Kudaev, Z. R. (2020). Innovative livestock production technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 421, 032012. https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/3/032012.

5. Фиапшев А. Г., Кильчукова О. Х. Энергетическая оценка биогазовой установки БГУ-М. / / Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 3 (39). – С. 193–198.

Для цитирования:
Фиапшев А. Г., Хамоков М. М., Кильчукова О. Х., Темукуев Б. Б., Фиапшев Б. А. Оптимизация параметров и режимов работы биогазовой установки для достижения максимального выхода биометана / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 41–45. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-41-45.

Cite this paper:
Fiapshev, A. G., Khamokov, M. M., Kilchukova, O. Kh., Temukuev, B. B., Fiapshev, B. A. (2021). Optimization of parameters and operation modes of a biogas plant for achieving the highest biomethane yield. *Energy Safety and Energy Economy,* 3, 41–45 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-41-45.

Optimization of parameters and operation modes of a biogas plant for achieving the highest biomethane yield

A. G. Fiapshev,
Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Nalchik, Russia, PhD, associate professor

M. M. Khamokov,
Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Nalchik, Russia, PhD, associate professor

O. Kh. Kilchukova,
Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Nalchik, Russia, PhD, associate professor

B. B. Temukuev,
Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Nalchik, Russia, PhD, associate professor

B. A. Fiapshev,
Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Nalchik, Russia

Anaerobic fermentation is a promising option for biogas production for bioenergy needs. Our theoretical study was focused on anaerobic fermentation of livestock waste by a novel biomethane plant substantiating its design, technical scheme, and operation modes. We have also determined an impact of each process condition factor contributing to biomethane yield, such as fermentation temperature, substrate mixing time, and a number of revolutions heater agitator of a biogas plant. The results of the given theoretical study have been proven by test performance of a model and experiments plants.

Keywords: *biogas plant, biomethane, multifactor experiment, anaerobic digestion.*

References

1. Baragunov, A. B. (2019). Predlozhenia po sovershenstvovaniyu tekhnologii proizvodstva produktsii molochnogo zhivotnovodstva v gornykh usloviyakh Severo-Kavkazskogo federalnogo okruga [Recommendations for improvement of production technology of dairy animal farming in mountain conditions of the North Caucasian federal district]. *Don Agrarian Science Bulletin,* 4, 35–42.

2. Apazhev, A. K. (2020). Osnovnye napravleniya realizatsii politiki energosberezheniya i povysheniya energoeffektivnosti [Major trends in energy saving and energy efficiency policy implementation]. Energosberezhenie i *Energoeffektivnost: Problemy i Reshenia. Proc. of the 9th National Scientific Conference,* Nalchik, pp. 8–11.

3. Apazhev, A. K. (2021). Osnovnye napravleniya kompleksnoy mekhanizatsii selskokhozyaystvennogo proizvodstva [Major trends in general mechanization of agriculture]. *Aktualnye problemy agrarnoy nauki: prikladnye i issledovatelskie aspekty,* I, 14–17.

4. Baragunov, A. B., Savvateeva, I. A., Kushaev, S. H., Kumakhov, A. A., & Kudaev, Z. R. (2020). Innovative livestock production technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 421, 032012. https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/3/032012.

5. Fiapshev, A. G., Kilchukova, O. Kh. (2015). Energeticheskaya otsenka biogazovoy ustanovki BGU-M [Energy evaluation of a BSU-M biogas plant], *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex,* 3, 193–198.

УДК 621.311.22 DOI 10.18635/2071-2219-2021-3-46-51

Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения температуры провода воздушной линии

В. О. Акуличев,
ПАО «МРСК Центра и Приволжья»,
первый заместитель генерального директора, директор по развитию

В. Ю. Непомнящий,
ПАО «МРСК Центра и Приволжья», филиал «Тулэнерго»,
первый заместитель директора – главный инженер

С. Г. Висич,
ПАО «МРСК Центра и Приволжья», ведущий инженер

М. В. Панарин,
ООО «СервисСофт Инжиниринг», директор, кандидат технических наук

А. А. Маслова,
Тульский государственный университет, доктор технических наук,
доцент кафедры охраны труда и окружающей среды

В продолжение исследований, результаты которых опубликованы в журнале «Энергобезопасность и энергосбережение», № 2 2021 г., рассмотрены математические модели для дистанционной диагностики проводов воздушных линий по каналу температуры: модель расчета допустимой токовой нагрузки по температуре провода и модель сохранения допустимых габаритов воздушной линии по температуре провода и токовой нагрузке. Полученные результаты находят применение в оперативных службах электросетевых компаний.

Ключевые слова: *дистанционная диагностика, воздушная линия электропередачи, электрический ток, температура провода, диспетчерский пункт.*

В соответствии со стратегической задачей по цифровизации энергетического сектора в рамках программы «Цифровая экономика» в ООО «СервисСофт» и филиале «Тулэнерго» ПАО «МРСК Центра и Приволжья» разрабатывают серию модулей интеллектуальной диагностики воздушных линий электропередачи ВЛ 6–220 кВ, в том числе ведется разработка математических моделей модулей диагностики проводов воздушных линий 6–220 кВ. В настоящей статье рассматривается математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения температуры провода воздушной линии. Для построения математической модели модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения температуры провода ВЛ должна быть определена последовательность измеренных значений температуры датчика при квантовании во времени и последовательность измеренных значений температуры окружающего воздуха по данным метеостанции.

Разность температур датчика и окружающего воздуха определяется выражением:

$$\vartheta_{dm}(k)=\vartheta_d(k)-\vartheta_m(k), \quad (1)$$

где ϑ_d – температура датчика, °С;

ϑ_m – значение температуры окружающего воздуха по данным метеостанции, °С;

k – порядок отсчета значений переменных при квантовании.

Если для k отсчета соблюдается соотношение $\vartheta_{\text{доп. мин } dm} < \vartheta_{dm}(k) < \vartheta_{\text{доп. макс } dm}$, то $\vartheta_{\text{пр}}(k) < \vartheta_d(k)$, при этом $\vartheta_{\text{доп. мин } dm}$ – минимальная отрицательная допустимая разность температур датчика и окружающего воздуха, °С; $\vartheta_{\text{доп. макс } dm}$ – максимальная положительная допустимая разность температур датчика и окружающего воздуха, °С.

В противном случае формируется сообщение об ошибке считывания значения температуры датчика и запускается счетчик ошибочных значений температуры датчика.

Значения температуры провода воздушной линии электропередачи $\vartheta_{\text{пр}}$ на интервале от $\vartheta_{\text{пр}}(k+1)$ до $\vartheta_{\text{пр}}(k+nt_d)$ заполняются величинами:

$$\vartheta_{\text{пр}}\left(k+\left(1\ldots n\vartheta_d\right)\right)= \\ =\frac{1}{n\vartheta_d}\left(\sum_k^{k+n\vartheta_d/2}\vartheta_{\text{пр}}(k)+\sum_{k+\frac{n\vartheta_d}{2}+1}^{n\vartheta_d}\vartheta_{\text{пр}}\left(k+n\vartheta_d\right)\right), \quad (2)$$

где n – номер отсчета значений переменных при квантовании.

В результате получаем последовательность отсчетов температуры провода от последнего измеренного значения k:

$$\vartheta_{пр}(k),\ \vartheta_{пр}(k-1),\ \vartheta_{пр}(k-2),\ \ldots\ \vartheta_{пр}(2),\ \vartheta_{пр}. \quad (3)$$

Математическая модель расчета допустимой токовой нагрузки по температуре провода на базе модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ

Современные методы расчета температуры провода и допустимой токовой нагрузки основаны на решении уравнения теплового баланса [1], записанного в дифференциальной форме для единицы длины неизолированного провода (1 м):

$$C_{пр}\frac{d\vartheta_{рпр}}{dt}=K_М K_П I_{ВЛ}^2 R_{20}\left(1+\beta_r\left(\vartheta_{пр}-20\right)\right)+ +P_с-\left(\alpha_К-\alpha_Л\right)F_П\left(\vartheta_{рпр}-\vartheta_в\right), \quad (4)$$

где $\vartheta_{рпр}$ – расчетная температура провода, °С;
t – время, с;
$C_{пр}$ – теплоемкость 1 м провода, Дж/°С;
$I_{ВЛ}$ – действующее значение тока в проводе, А;
R_{20} – сопротивление 1 м провода постоянному току при температуре 20 °С, Ом;
$K_П$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь на переменном токе;
$K_М$ – коэффициент, учитывающий магнитные потери в проводе со стальным сердечником;
βr – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С;
$P_с$ – мощность солнечного излучения, поглощаемая проводом, Вт;
$\alpha_К$ – коэффициент, учитывающий теплоотдачу при теплообмене конвекцией, Вт/(м^2 °С);
$\alpha_Л$ – коэффициент, учитывающий теплоотдачу при лучистом теплообмене, Вт/(м^2 °С);
$F_П$ – площадь поверхности теплообмена, м^2;
$\vartheta_в$ – температура воздуха, °С;

Детальное описание составляющих уравнения (3) приведено в [1], уточненная методика определения коэффициента теплоотдачи конвенцией и альтернативные формулы для вычисления коэффициента, учитывающего теплоотдачу при лучистом теплообмене, приведены в [2–4].

Преобразуем уравнение в дискретное по времени с периодом ϑ квантования измерений с датчика температуры. Для отсчета k значений переменных температуры при квантовании уравнение примет вид:

$$\vartheta_{рпр}(k)=\vartheta_{рпр}(k-1)+ +\frac{1}{C_{пр}}T\begin{bmatrix}K_М K_П I_{ВЛ}^2 R_{20}\left(1+\beta_r\left(\vartheta_{пр}-20\right)\right)+P_с(k)- \\ -\left(\alpha_К-\alpha_Л\right)F\left(\vartheta_{рпр}(k)-\vartheta_в(k)\right)\end{bmatrix}. \quad (5)$$

Модуль интеллектуальной диагностики провода ВЛ снабжен датчиками температуры и тока. Кроме того, предусмотрена возможность получения информации о температуре окружающего воздуха и мощности солнечного излучения в реальном масштабе времени. Это позволяет подставлять реальные значения и получить следующее соотношение со сдвигом на один шаг вперед по времени:

$$\vartheta_{рпр}(k+1)=\vartheta_{пр}(k)+\frac{1}{C_{пр}}T\times \times\left(K_Т\cdot I_{ВЛ}^2+P_с(k)-\left(\alpha_К-\alpha_Л\right)F\cdot\vartheta_{dm}(k)\right), \quad (6)$$

где ϑ_{dm} – разность температур датчика температуры и окружающего воздуха, °С;
$K_Т = K_М K_П R_{20}(1+\beta_r(\vartheta_{пр}(k)-20))$ – коэффициент, учитывающий изменение температуры провода под действием протекающего тока.

Значение $\vartheta_{рпр}(k+1)$ есть прогнозное значение температуры провода на один период квантования по времени. Значение $\vartheta_{пр}(k)$ берется от датчика температуры модуля интеллектуальной диагностики в реальном масштабе времени. Значение $K_Т$ рассчитывается в зависимости от реального значения температуры от датчика модуля интеллектуальной диагностики провода. Значение $P_с(k)$ принимается от метеостанции на сервер диспетчерского пункта. Значение $\vartheta_d(k)$ рассчитывается на сервере диспетчерского пункта как разность температур, принимаемых от датчика модуля интеллектуальной диагностики и от метеостанции в реальном масштабе времени.

В результате исполнения уравнения (6) производится прогноз температуры на шаг квантования с учетом реальных измеренных значений температуры протекающего по проводу тока, мощности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха [1].

Измеренные и расчетные переменные приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Измеренные и расчетные переменные для расчета прогнозного значения температуры провода
Measured and calculated variables for wire temperature prediction

Данные датчиков модуля интеллектуальной диагностики	Данные, полученные от метеостанции
Температура провода ϑ_d, °С	Температура воздуха ϑ_m, °С
Ток провода $I_{ВЛ}$, А	Мощность солнечного излучения $P_с$, Вт

Для оценки прогноза проводится сравнение прогнозной температуры провода с измеренной. При превышении модуля рассогласование между прогнозным и измеренным значениями температуры провода допустимого значения формируется сигнал предупреждения диспетчерской службы.

Математическая модель расчета сохранения допустимых габаритов ВЛ до земли по температуре провода и токовой нагрузке на базе модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ

При одинаковой высоте подвеса провода (разность высот подвеса проводов составляет менее 10 % от длины пролета) и длине пролета менее 450 м допустимую температуру провода по условию сохранения допустимых габаритов до земли можно определить следующим образом. Сначала выполняются расчеты габаритов ВЛ в наиболее проблемных пролетах [1, 5]. Проблемными являются пролеты, у которых, по данным измерений, габариты менее чем на 1 м больше допустимого по ПУЭ значения. При этом учитываются:

– измеренный габарит ВЛ до земли, $h_{з.\ и}$, м;
– измеренный габарит до препятствия, $h_{преп.\ и}$, м;
– измеренная температура провода, $t_{пр.\ и}$, °С.

Допустимая температура по условию сохранения допустимого габарита до земли определяется по формуле:

$$t_{г.\ доп} = t_{пр.\ и} + \frac{\gamma_1 l_{пр}^2}{8\beta_л E}\left(\frac{1}{h_{пр}-h_{з.\ и}} - \frac{1}{h_{пр}-h_{з.\ доп}}\right) - \frac{8}{3\beta_л l_{пр}^2}\left(\left(h_{пр}-h_{з.\ и}\right)^2 - \left(h_{пр}-h_{з.\ доп}\right)^2\right), \quad (7)$$

где $l_{пр}$ – длина пролета ВЛ, м;
E – модуль упругости провода, Н/мм^2;
$\beta_л$ – температурный коэффициент линейного удлинения, град$^{-1}$;
$h_{пр}$ – высота подвеса провода, м;
$h_{з.\ доп}$ – допустимое расстояние до земли по ПУЭ, м.

Допустимая температура по условию сохранения допустимого габарита до препятствия или пересечения определяется по приведенной выше формуле путем подстановки вместо $h_{з.\ доп}$ значения габарита до земли $h_з$, при котором нарушается допустимый габарит до препятствия $h_{преп.\ доп}$.

Габарит $h_з$ рассчитывается по формуле:

$$h_з = h_{пр} - \frac{l_{пр}^2\left(h_{пр}-h_{преп.\ доп}-h_{преп}\right)}{4l_{преп}\left(l_{пр}-l_{преп}\right)}, \quad (8)$$

где $h_{преп}$ – высота препятствия, м;
$l_{преп}$ – расстояние от препятствия до ближайшей опоры, м;
$h_{преп.\ доп}$ – допустимый габарит до препятствия по ПУЭ, м.

Метод расчета допустимой температуры провода по условию сохранения допустимых габаритов ВЛ основан на теории провисания гибкой однородной тяжелой нити [6–8]. При этом кривая провисания принимает форму цепной нити. Уравнение этой кривой при этом записывается в следующем виде:

$$y = y_0 \mathrm{ch}\left(\frac{x}{y_0}\right),\ y_0 = \sigma_0 / y_1,$$

где x – координата по горизонтальной оси;
σ_0 – механическое напряжение в проводе в низшей точке провиса, Н/мм^2.

Кривая провисания пролета ВЛ показана на рис. 1.

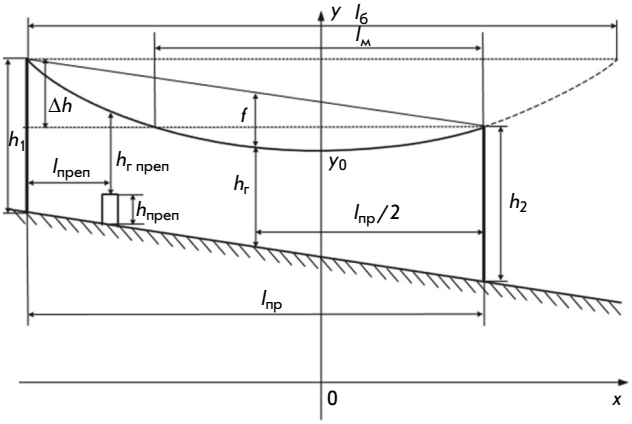


Рис. 1. Кривая провисания пролета ВЛ

Fig. 1. Overhead power line span curve

По измеренному габариту до земли в середине пролета определяется расчетное значение напряжения в низшей точке провеса провода, $\sigma_{0р}$, путем численного решения системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\sigma_{0р}}{\gamma_1}\left(\mathrm{ch}\left(\dfrac{\gamma_1\left(l_{м\,р}-l_{пр}\right)}{4\sigma_{0р}}\right) - \dfrac{l_{пр}}{l_{б\,р}-l_{м\,р}}\left(\mathrm{ch}\left(\dfrac{\gamma_1 l_{б\,р}}{2\sigma_{0р}}\right) - \mathrm{ch}\left(\dfrac{\gamma_1 l_{м\,р}}{2\sigma_{0р}}\right) + \dfrac{\gamma_1\left(h_2-h_1\right)}{\sigma_{0р}}\right) - \mathrm{ch}\left(\dfrac{\gamma_1 l_{м\,р}}{2\sigma_{0р}}\right)\right) + \\ + h_2 = h_{з.\ изм}; \\ \dfrac{\sigma_{0р}}{\gamma_1}\left(\mathrm{ch}\left(\dfrac{\gamma_1 l_{б\,р}}{2\sigma_{0р}}\right) - \mathrm{ch}\left(\dfrac{\gamma_1\left(l_{пр}-l_{б\,р}\right)}{2\sigma_{0р}}\right)\right) = \Delta h; \\ \dfrac{l_{б\,р}+l_{м\,р}}{2} = l_{пр}, \end{cases} \quad (9)$$

где $l_{б\ р}$, $l_{м\ р}$ – расчетные длины большого и малого эквивалентных пролетов, м (рис. 1);
Δh – разность высот подвеса провода, м;
h_1, h_2 – высоты от основания опор до точки крепления провода, м.

Расчет ведется методом Ньютона по итерационным формулам:

$$l_{б(k)} = l_{б(k-1)} + \Delta l_{(k)};$$
$$\sigma_{0(k)} = \sigma_{0(k-1)} + \Delta\sigma_{(k)}$$

до тех пор, пока

$$\left(\left(\Delta l_{(k)}\right)^2+\left(\Delta\sigma_{(k)}\right)^2\right)\geq\varepsilon,$$

где ε – требуемая точность расчета.

Далее определяются значения габаритов до земли, $h_з$, в середине пролета и до препятствия или пересечения, $h_{г.\ преп}$, по формулам:

$$h_з=\frac{\sigma_0}{\gamma_1}\left(\begin{array}{l}\mathrm{ch}\left(\frac{\gamma_1\left(l_м-l_{пр}\right)}{4\sigma_0}\right)-\frac{l_{пр}}{l_б+l_м}\left(\begin{array}{l}\mathrm{ch}\left(\frac{\gamma_1 l_б}{2\sigma_0}\right)-\\-\mathrm{ch}\left(\frac{\gamma_1 l_м}{2\sigma_0}\right)+\\+\frac{\gamma_1\left(h_2-h_1\right)}{\sigma_0}\end{array}\right)-\\-\mathrm{ch}\left(\frac{\gamma_1 l_м}{2\sigma_0}\right)\end{array}\right)+h_2;$$

$$h_{г.\ преп}=\frac{\sigma_0}{\gamma_1}\left(\begin{array}{l}\mathrm{ch}\left(\frac{\gamma_1\left(l_{преп}-l_б\right)}{4\sigma_0}\right)-\frac{l_б+l_м-2l_{преп}}{l_б+l_м}\times\\\times\mathrm{ch}\left(\frac{\gamma_1 l_б}{2\sigma_0}\right)-\mathrm{ch}\left(\frac{\gamma_1 l_м}{2\sigma_0}\right)+\\+\frac{\gamma_1\left(h_2-h_1\right)}{\sigma_0}-\\-\mathrm{ch}\left(\frac{\gamma_1 l_м}{2\sigma_0}\right)\end{array}\right)+h_2-h_{преп}. \quad (10)$$

Если $h_з < h_{з.\ доп}$ и $h_{г.\ преп} < h_{з.\ преп.\ доп}$, то температура провода увеличивается на значение $\Delta\vartheta_{пр}$ и расчеты повторяются. Расчет выполняется до тех пор, пока габарит до земли или до препятствия достигнет допустимого значения. Таким образом определяется допустимая температура провода.

Математические модели модуля по каналу температуры, расчета допустимой токовой нагрузки по температуре провода и сохранения допустимых габаритов ВЛ по температуре провода и токовой нагрузке реализуются на микропроцессоре модуля дистанционной диагностики проводов ВЛ и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании ПАО «МРСК Центра и Приволжья». В частности, данные модели использовались при разработке модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения температуры провода ВЛ «Звезда – Бегичево», опора № 279 [8].

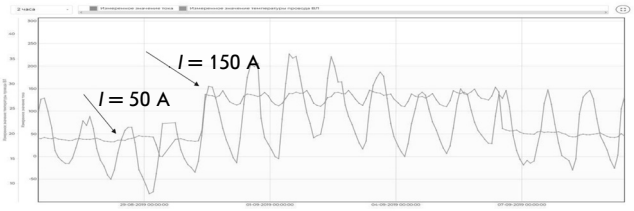


Рис. 2. Модуль дистанционной диагностики ВЛ «Звезда – Бегичево», опора № 279. С 30.08.2019 по 6.09.2019 г. было зафиксировано увеличение силы тока кратно с 50 до 150 А

Fig. 2. Remote diagnostics module of the Zvezda – Begichevo overhead power line, pole #279. On August 30, 2019 to September 6, 2019 amperage increased from 50 to 150 amps

На рис. 2 отражено фиксирование увеличения силы тока кратно с 50 до 150 А. Возможная причина – увеличение нагрузки и, как следствие, увеличение температуры провода.

Таким образом, разработана математическая модель дистанционного мониторинга проводов воздушных линий по каналу измерения температуры с расчетом допустимой токовой нагрузки по температуре провода при условии сохранения габаритов ВЛ. Практическая ценность разработанной модели состоит в использовании полученных уравнений при реализации системы дистанционного мониторинга проводов ВЛ с применением модулей дистанционной диагностики, монтируемых непосредственно на провода, фиксирующих температуру провода в реальном масштабе времени и передающих данные на сервер электросетевой компании. Полученные теоретические и практические результаты, как и сам модуль дистанционной диагностики проводов, находят применение в оперативных службах электросетевых компаний.

Литература

1. СТО 56947007-29.240.55.143-2013 ОАО «ФСК ЕЭС». Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. – 2013.

2. Правила устройства электроустановок. Изд. 7-е. – Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ.

3. Бубенчиков А. А., Гиршин С. С., Петрова Е. В. Применение численных методов расчета тепловых полей для вычисления потерь энергии в электрических сетях с учетом температуры проводников / / Омский научный вестник. – 2008. – № 1. – С. 84–87.

4. Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Горюнов В. Н., Левченко А. А., Петрова Е. В. Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов / / Омский научный вестник. – 2009. – № 3. – С. 171–175.

5. Войтов О. Н., Попова Е. В. Алгоритм учета температуры провода при расчете потокораспределения в электрической сети / / Электричество. – 2010. – № 9. – С. 24–30.

6. Фигурнов Е. П., Жарков Ю. И., Петрова Т. Е. Уточненная методика расчета нагрева проводов воздушных линий электропередачи / / Электрические станции. – 2013. – № 9. – С. 54–59.

7. Guide for thermal rating calculations of overhead lines. WG B2.43, Tech. Rep. 601, CIGRE, 2014.

8. Mo, Y., Zhou, X., Wang, Y., Liang, L. (2017). Study on operating status of overhead transmission lines based on wind speed variation. *Progress in Electromagnetics Research M*, 60, 111–120. https://doi.org/10.2528/pierm17072605.

Для цитирования:

Акуличев В. О., Непомнящий В. Ю., Висич С. Г., Панарин М. В., Маслова А. А. Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения температуры провода воздушной линии / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 46–51. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-46-51.

Cite this paper:

Akulichev, V. O., Nepomnyashchy, V. Yu., Visich, S. G., Panarin, M. V., Maslova, A. A. (2021). Mathematical model of a remote monitoring module by wire temperature of an overhead power line. *Energy Safety and Energy Economy*, 3, 46–51 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-46-51.

Mathematical model of a remote monitoring module by wire temperature of an overhead power line

V. O. Akulichev,
Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region, Russia,
first deputy CEO, development director

V. Yu. Nepomnyashchy,
Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region, Tulenergo, Russia,
first deputy director, head engineer

S. G. Visich,
Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region, Russia, lead engineer

M. V. Panarin,
ServiceSoft Engineering LLC, Russia, director, PhD

A. A. Maslova,
Tula State University, Russia, Doctor of Science

In continuation of the previously published research results (Energy Safety and Energy Economy, iss. 2, 2021), we have developed wire temperature-based mathematical models for overhead power line monitoring. Mathematical models simulate allowable amperage load considering the temperature and an allowable wire sag considering the temperature and amperage. The proposed mathematical models became a base for overhead power line remote control tools being currently tested at power utility companies.

Keywords: *remote diagnostics, overhead power line, electric current, wire temperature, control room.*

References

1. STO 56947007-29.240.55.143-2013. Calculation methodology for current limit loads for preserving mechanical strength of wires and acceptable dimensions of overhead power lines.

2. Electrical installation guide – Part 2.5: Overhead power lines above 1 kV.

3. Bubenchikov, A. A., Girshin, S. S., Petrova, E. V. (2008). Primenenie chislennykh metodov rascheta teplovykh poley dlya vychisleniya poter energii v elektricheskikh setyakh s uchetom temperatury provodnikov [Application of numerical methods of thermal fields calculation for calculation of energy losses in electric networks in view of conductor temperature]. *Omsk Scietntific Bulletin*, 1, 84–87.

4. Bubenchikov, A. A., et al. (2009.) Analiz raspredeleniya temperatury po secheniyu samonesuschikh izolirovannykh provodov [Temperature distribution analysis by sectioning of self-bearing insulated wires]. *Omsk Scietntific Bulletin*, 3, 171–175.

5. Voytov, O. N., Popova, E. V. (2010). Algoritm ucheta temperatury provoda pri raschete potokoraspredeleniya v elektricheskoy seti [Algorithm for current distribution calculating considering wire temperature in an electrical grid]. *Elektrichestvo,* 9, 24–30.

6. Figurnov, E. P., Zharkov, Y. I., Petrova, T. E. (2013). Utochnennaya metodika rascheta nagreva provodov vozdushnykh liniy elektroperedachi [Calculations of heating of the uncovered wires of air power lines]. *Elektricheskie Stantsii,* 9, 54–59.

7. Guide for thermal rating calculations of overhead lines. WG B2.43, Tech. Rep. 601, CIGRE, 2014.

8. Mo, Y., Zhou, X., Wang, Y., Liang, L. (2017). Study on operating status of overhead transmission lines based on wind speed variation. *Progress in Electromagnetics Research M,* 60, 111–120. https://doi.org/10.2528/pierm17072605.

УДК 331.108 DOI 10.18635/2071-2219-2021-3-52-55

Стратегия работы с персоналом на предприятиях электроэнергетики

А. В. Хакимов,
ПАО «Россети», независимый эксперт, Израиль

В статье показаны проблемы, связанные с управлением и оценкой персонала предприятий электроэнергетики. Предложены некоторые методы работы с сотрудниками организации на примере оперативного персонала подстанции 220 кВ. Рассмотрены основные проблемы в сфере работы с персоналом и недостатки кадрового администрирования. Предложен метод работы с персоналом, который включает в себя проведение таких мероприятий, как анкетирование работников, ранжирование персонала по определенным показателям и аттестация.

Ключевые слова: *управление персоналом, условия труда, методы оценки работы с персоналом, ранжирование персонала, аттестация.*

Несмотря на цифровизацию и оптимизацию в различных сферах управления ресурсами, предприятия электроэнергетики сталкиваются с рядом проблем в области работы с персоналом. Среди них дефицит квалифицированных и профессионально подготовленных специалистов, отсутствие или недостаточное качество профориентации сотрудников, непредоставление достойного материального вознаграждения за выполнение работниками должностных обязанностей, отсутствие развития в системе оплаты труда, отсутствие грамотной коммуникации в цепочке «руководитель – подчиненный», непринятие мер по повышению уровня знаний по охране труда, промышленной, пожарной безопасности и других нормативных документов, низкая компетентность руководителей высокого звена, не способных принимать решения ввиду отсутствия того объема знаний, который необходим для выполнения ряда производственных задач, отсутствие системы анализа деятельности персонала и, как следствие, рационализации ресурсов предприятия – трудовых, материальных, административных, информационных и прочих, и другие причины.

К основным недостаткам в кадровом администрировании и управлении персоналом в целом можно отнести следующие:

1. Текучесть персонала: согласно статистическим данным, показатель колеблется от 9,15 до 12,4 %.
2. Использование традиционных методов взаимодействия с персоналом, таких как метод «кнута и пряника»: поощрение за качественно выполненную работу и наказание за невыполнение производственных показателей.
3. Недостаток специализированных курсов, программ обучения.
4. Отсутствие карьерного роста.
5. Низкая оплата труда.

Высокая производительность труда, отсутствие технологических и иных нарушений и достижение целей предприятия во многом зависят от психо-логического комфорта как коллектива в целом, так и каждого сотрудника в отдельности. Психологически комфортные условия для работника в ходе трудовой деятельности могут включать ряд важных аспектов:

– достойный уровень заработной платы, зависящей от средней рыночной величины оплаты данного объема выполняемых функций, показателя цен на предметы потребления, инфляции, степени оценки работником профессиональных качеств и пр.;

– возможность заниматься деятельностью, которая не только приносит достойный доход, но и вызывает удовлетворение (современные сотрудники предпочитают ощущать себя не просто «машиной» для осуществления поставленных задач с целью получения материальных благ и не готовы выполнять лишь стандартные алгоритмы; вместо этого они хотят реализовать свой потенциал, принимать нестандартные решения в ходе деятельности и чувствовать свою значимость в процессе развития компании);

– признание коллективом и начальством (возвращаясь к предыдущему пункту – достойная заработная плата до сих пор является важным фактором выбора рабочего места, однако далеко не решающим);

– гибкость (смысл этого понятия для каждого индивидуален: это может быть упрощенный дресс-код, свободный график работы, гибкость при планировании отпуска и др.).

Поскольку именно персонал является главной движущей силой в организации, необходимо грамотно использовать данный ресурс, то есть подбирать, обучать, развивать и мотивировать.

Оптимизация процесса работы с персоналом

Проанализируем проблемы управления и работы с персоналом на примере персонала подстанции. В основные должностные обязанности дежурного электромонтера подстанции входят техническое обслуживание и эксплуатация оборудования, выполнение оперативных переключений, выявление нарушений в работе электрооборудования, оформление оперативной документации в соответствии с нормативными требованиями и т. д., причем

выполнение трудовых функций относится к работам повышенной опасности.

Можно предложить следующие методы оптимизации кадровых процессов в рамках вышеупомянутой подстанции.

1. Обязательное профильное психологическое интервью при приеме на работу. Должностные обязанности электромонтера связаны как с повышенной опасностью (электрический ток, работа на высоте), так и с непредвиденными, стрессовыми ситуациями (выход из строя оборудования, технологические нарушения). Поэтому при собеседовании важно оценивать, насколько оперативно сотрудник сможет правильно и адекватно отреагировать на критическую ситуацию – иными словами, определить уровень стрессоустойчивости. В широком смысле люди делятся на две группы: те, кто в непредвиденной ситуации не предпринимают никаких действий, даже если жизнь находится в опасности, и те, кто под действием высокой дозы адреналина в состоянии осуществлять умственную деятельность и принимать взвешенные решения. Первую группу не рекомендуется использовать на должности электромонтера.

2. Субординация при общении с подчиненными. Что касается объектов электроэнергетики, то руководителями таких объектов часто становятся вчерашние рядовые сотрудники (электромонтеры). Здесь сложно достичь баланса: с одной стороны, жесткий контроль вызовет негативное расположение подчиненных, что усложнит отношения в коллективе, снизит трудовую дисциплину и, соответственно, ухудшит производственные показатели. С другой стороны, панибратство по отношению к работникам становится причиной некомпетентности коллектива и несерьезного отношения к трудовым обязанностям. Поэтому важно выстроить четкую связь «начальник – подчиненный», уметь оценивать работников объективно и беспристрастно, разделять личное и служебное пространство.

3. Повышение сплоченности коллектива. Сплоченность является одной из самых важных социально-психологических характеристик коллектива и способствует достижению общих целей и задач. Рекомендуется внедрение мероприятий по развитию корпоративной культуры, а также различных процедур, направленных на интеллектуальное развитие персонала.

Для принятия решений об усовершенствовании методов работы с определенной категорией персонала необходимо для начала выполнить оценку персонала. Оценка поможет выявить слабые места в управленческой политике, а также составить как индивидуальный, так и коллективный портрет подчиненного персонала. Рассмотрим предлагаемые методы оценки персонала и работы с ним в рамках рассматриваемой подстанции, такие как анкетирование, ранжирование и аттестация.

Анкетирование персонала

Анкетирование персонала – это опрос, который позволяет собрать у работников информацию различного рода при помощи специальных бланков (анкет). Анкетирование персонала на объектах электроэнергетики усложняется тем, что помимо акцента на выполнение производственной деятельности по должностным или производственным инструкциям, от работников требуется знание документации по охране труда, промышленной и пожарной безопасности. Поэтому опрос должен быть направлен как на выявление удовлетворенности персонала работой на предприятии, так и на выявление слабых мест в обучении и развитии кадров. В данном случае предлагается использование вопросов анкеты исходя из следующих критериев для оценки удовлетворенности персонала: уровень заработной платы, график работы, взаимоотношения с руководством и коллегами, социальные компенсации и гарантии, возможность продвижения по карьерной лестнице, социальный климат в коллективе, оснащенность рабочего места, удовлетворенность рабочими обязанностями, обучение, развитие профессиональных навыков, мотивация со стороны руководства.

После анализа результатов анкетирования, используя балльную систему, можно выделить три категории подчиненного персонала:

– сотрудник категорически не удовлетворен работой в данной организации: это может выражаться как в низком уровне материального стимулирования, так в социальных, административных и психологических проблемах управления. Во втором случае предлагается сделать акцент на обучении и развитии персонала, провести дополнительные внеплановые инструктажи для ремонтного и оперативно-ремонтного персонала с акцентом на теоретические знания (изменения в нормативной документации: постановления, СНиПы, СанПиНы, приказы, кодексы, федеральные законы, локальные акты);

– сотрудник в целом удовлетворен своей деятельностью в компании, однако существует ряд проблем, которые, влияя на психологический климат коллектива, могут также снижать производительность труда. Рекомендуемые мероприятия: процедуры по сплочению коллектива как в рабочее время, так и развитие корпоративной культуры в свободное время (проведение спортивных мероприятий, тематических собраний, различных тренингов, направленных на сплочение коллектива и т. д.). Даже учитывая тот факт, что в рассматриваемом случае работники встречаются только при сдаче/приемке смены и понятие «коллектив» больше носит формальный характер, тем не менее, психологический климат оказывает значительное влияние на степень удовлетворенности работника;

– сотрудник, выполняя свои должностные обязанности в данной организации, находится в зоне комфорта. Работа со стороны непосредственного руководителя должна состоять как в повышении теоретических знаний и развитии корпоративной культуры (как в вышеуказанных пунктах), так и в проведении дополнительного обучения. Это может быть как развитие узконаправленных специализированных навыков, так и обучение, направленное на управление (карьерный рост). Такой подход решает ряд задач: повышает эффективность работы, стимулирует

персонал, снижает потребность в контроле, решает проблему дефицита кадров.

Ранжирование персонала

Если при анкетировании выявляются в целом слабые места в управлении сотрудниками, то ранжирование помогает оценить работников по ряду показателей, а затем ранжируемые оцениваются по принципу от лучшего к худшему. В данном случае предлагается ранжирование по таким показателям, как ответственность, дисциплинированность, производительность и креативность. В результате выявляются наиболее эффективные работники и работники с низкой эффективностью: со вторыми проводится более тщательная работа со стороны руководителя, которая может проявляться как в обучении, развитии и дополнительном образовании, так и в прочих организационных решениях (перевод на менее ответственную должность, изменения в заработной плате, увольнение и т. д.).

Аттестация

Главная цель аттестации – проанализировать работу сотрудников (как каждого в отдельности, так и коллектива в целом) и обнаружить слабые места с целью поиска решений для устранения существующих проблем. При этом одной из задач грамотного руководителя должно стать донесение информации до работников о том, что непрохождение аттестации не означает последующего увольнения или применения прочих карательных мер. Помимо непосредственно оценки уровня профессиональных знаний и навыков это способ оценить степень дисциплинированности коллектива, проверить мотивированность работников и выполнить анализ вектора развития организации.

Что касается объектов электроэнергетики, то от качественного выполнения производственных задач зависят бесперебойная работа оборудования и производственный травматизм. Согласно трудовому законодательству, ремонтный и оперативно-ремонтный персонал на регулярной основе должны проходить проверку знаний правил работы в электроустановках, охраны труда и пожарной безопасности, которая показывает уровень компетентности, необходимый для нахождения на данной должности.

Рационализация повторных инструктажей

Повторный инструктаж – мероприятие, проводимое не реже одного раза в полгода по утвержденным графикам для определенных категорий работников. Если рассматривать персонал подстанции, то повторные инструктажи проводятся не реже одного раза в квартал. К сожалению, сегодня план повторных инструктажей создается на год вперед лишь с учетом профессиональной категории работников и, как правило, редко корректируется. Кроме того, повторные инструктажи носят больше формальный характер: зачитанный текст начальника и роспись в журнале проведения инструктажей. Важным условием для повышения эффективности работы оперативного персонала является составление индивидуального годового плана проведения повторных инструктажей для каждого объекта, исходя из результатов вышеизложенных методов оценки работников на этом объекте.

Предлагаются следующие методы проведения повторного инструктажа:

1. Кросс-опрос – вид обратной связи, при которой происходит взаимодействие персонала путем постановки вопросов как со стороны начальника, так и со стороны коллег. Это могут быть вопросы, непосредственно связанные с профессией (работы на коммутационных аппаратах, обслуживание комплектных распределительных устройств, производство земляных работ и т. д.), а также основные моменты по охране труда (работы со снятием напряжения, осмотр электроустановок, вопросы оказания доврачебной помощи пострадавшим от действия электрического тока и т. д.)

2. Показ учебных фильмов. Зрительное восприятие материала позволяет усваивать его с гораздо большей эффективностью по сравнению с восприятием на слух.

3. Новостной контекст. Однообразная подача материала снижает его усваиваемость. Дополнение материала сведениями о новостях электротехнической промышленности, технических тенденциях и актуальных проблемах отрасли поможет как расширить кругозор сотрудников, так и снять возникающий уровень психологического напряжения.

Стоит еще раз отметить, что эффективность отдельно взятого работника зависит не только от его профессиональных навыков и опыта, но и в значительной степени от индивидуальности подхода руководителя к процессу обучения и профессионального развития подчиненного ему персонала. Каждый из рассмотренных в статье методов в отдельности не в полной мере способен оптимизировать управление персоналом на предприятии, сократить текучесть кадров, рационализировать ресурсы или мотивировать работников, но использование сочетания методов на отдельно взятом объекте электроэнергетики позволит решить целый ряд задач. С установлением грамотных профессиональных отношений в цепочке «подчиненный – руководитель» появляется возможность снизить текучесть персонала, повысить его компетентность, что снизит количество технологических нарушений и производственный травматизм, а также будет способствовать установлению комфортного психологического климата, что повысит производственную эффективность.

Литература

1. Кибанов А. Я. Управление персоналом организации: актуальные технологии найма, адаптации и аттестации. – М: Кронус, 2012. – 368 с.

2. Семина А. П., Федотова М. А., Тихонов А. И. Обучение персонала в современных компаниях: проблемы и новые направления / / Московский экономический журнал. – 2016. – № 3. – С. 134–145.

3. Озерникова Т. Г. Управление персоналом организации. – Иркутск: БГУ, 2015. – 546 с.

4. Пинк Д. Драйв: что на самом деле нас мотивирует. – М: Alpina Digital, 2013. – 273 с.

5. Крымов А. А. Адаптация топ-менеджеров: проблемы и решения. – Справочник по управлению персоналом. – 2011. – № 10. – С. 36–41.

6. Яньшин П. В. Практикум по клинической психологии. Методы исследования личности. – СПб.: Питер, 2004. – 336 с.

7. Балашов А. И., Котляров И. Д., Санина А. Г. Управление человеческими ресурсами. – СПб.: Питер, 2012. – 320 с.

Для цитирования:

Хакимов А. В. Стратегия работы с персоналом на предприятиях электроэнергетики / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 52–55. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-52-55.

Cite this paper:

Hakimov, A. V. (2021). Staff management strategies at power engineering companies. *Energy Safety and Energy Economy*, 3, 52–55 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-52-55.

Staff management strategies at power engineering companies

A. V. Hakimov,
Rosseti PJSC, independent expert, Israel

Staff management strategy includes a plan on how to optimize employee performance within a company. Other than being compensated fairly, employees need to feel valued, be given feedback, and provided with growth opportunities. This paper examines human resources management problems and strategies at power engineering companies. As an example, 220 kV power substation has been reviewed in regards of staff managing methods and possible solutions. Certain employee management methods, i.e. employee surveys, ratings, and certification have been suggested in order to reduce the incidence of electrical violations during the operation of substations and increase workplace wellbeing at power engineering companies.

Keywords: *staff management, workplace conditions, human resources evaluation methods, employee ratings, certification.*

References

1. Kibanov, A. Ya. (2012). *Upravlenie personalom organizatsii: aktualnye tekhnologii nayma, adaptatsii i attestatsii* [Human resource management: Current technologies of recruitment, adaptation, and testing]. Moscow, Knorus.

2. Semina, A. P., Fedotova, M. A., Tikhonov, A. I. (2016). Obuchenie personala v sovremennykh kompaniyakh: problemy i novye napravleniya [Staff training in today's companies: Problems and new trends]. *Moscow Economic Journal*, 3, 134–145.

3. Ozernikova, T. G. (2015). *Upravlenie personalom organizatsii* [Organizational human resources management]. Irkutsk, Baikal State University.

4. Pink, D. (2013). Drive. *The surprising truth about what motivates us*. Moscow, Alpina Digital.

5. Krymov, A. A. (2011). Adaptatsiya top-menedzherov: problemy i resheniya [Adaptation of top managers: Problems and solutions]. *Spravochnik po Upravleniyu Personalom*, 10, 36–41.

6. Yanshin, P. V. (2004). *Praktikum po klinicheskoy psikhologii. Metody issledovaniya lichnosti* [Clinical psychology tutorial. Personality research methods]. St. Petersburg, Piter Publishing House.

7. Balashov, A. I., Kotlyarov, I. D., Sanina, A. G. (2012). *Upravlenie chelovecheskimi resursami* [Human resource management]. St. Petersburg, Piter Publishing House.

Автономная некоммерческая организация «Национальное агентство развития квалификаций»

ПРИКАЗ
от 14 мая 2021 г. № 30/21-ПР

Об утверждении наименований квалификаций и требований к квалификациям в электроэнергетике

В соответствии с пунктом 4 статьи 6 федерального закона от 3 июля 2016 г. № 238 и подпунктом б пункта 17 Положения о разработке наименований квалификаций и требований к квалификации, на соответствие которым проводится независимая оценка квалификации, утвержденного приказом Минтруда России от 12 декабря 2016 г. № 726н приказываю:

1. Утвердить одобренные Национальным советом при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям (протокол от 12 марта 2021 г. № 51) наименования квалификаций и требования к квалификациям, подготовленные Советом по профессиональным квалификациям в электроэнергетике (Приложение).

2. Департаменту систем оценки квалификаций (А. С. Перевертайло) внести соответствующие изменения в Реестр сведений о проведении независимой оценки квалификаций и разместить на сайте автономной некоммерческой организации «Национальное агентство развития квалификаций» nark.ru утвержденные наименования квалификаций и требований к квалификациям в электроэнергетике.

3. Настоящий приказ вступает в силу 1 сентября 2021 г. и действует до 1 сентября 2027 г.

4. Контроль за исполнением настоящего приказа оставляю за собой.

Генеральный директор
А. Н. Лейбович

Приложение
к приказу АНО НАРК
от 14 мая 2021 № 30/21-ПР

Наименования квалификаций и требования к квалификациям, на соответствие которым проводится независимая оценка квалификации, представленных советом по профессиональным квалификациям в электроэнергетике

Номер в реестре сведений о проведении независимой оценки квалификации[1]	Наименование квалификации	Наименование и реквизиты профессионального стандарта, на соответствие которому проводится независимая оценка квалификации	Уровень (подуровень) квалификации в соотв. с профессиональным стандартом	Положения профессионального стандарта			Квалификационное требование	Перечень документов, необходимых для прохождения профессионального экзамена по соответствующей квалификации	Срок действия Свидетельства о квалификации	Дополнительные характеристики (при необходимости): профессии рабочего, должности руководителя, специалиста и служащего в соответствии с ЕТКС, ЕКС[2], с указанием разряда работы, профессии/категории должности/класса профессии
				Код трудовой функции	Наименование трудовых функций	Дополнительные сведения (при необходимости)				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Электромонтер по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (3 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	3	A/01.3	Техническое обслуживание аппаратуры РЗА ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Свидетельство о профессии в области обслуживания РЗА. 2. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III	5 лет	Электромонтер по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики 3–4 разряда, ЕТКС электроэнергетики, раздел «Ремонт оборудования электростанций и сетей», § 26–27
				A/02.3	Устранение дефектов аппаратуры РЗА ГЭС/ГАЭС					
	Электромонтер по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (4 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	4	B/01.4	Техническое обслуживание устройств релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие среднего профессионального образования по программам подготовки квалифицированных рабочих по профилю подтверждаемой квалификации. 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта рабо-	5 лет	Электромонтер по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики 5–6 разряда, ЕТКС электроэнергетики, раздел «Ремонт оборудования электростанций и сетей», § 28–29

[1] Присваивается Национальным агентством при внесении в реестр информации о наименовании квалификации и требованиях к квалификации, на соответствие которым проводится независимая оценка квалификации, с указанием сроков действия свидетельств о квалификации и документов, необходимых для прохождения соискателем профессионального экзамена по соответствующей квалификации.

[2] Единый тарифно-квалификационный справочник работ и профессий рабочих, ЕКС – Единый квалификационный справочник должностей руководителей, специалистов и служащих.

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
								ты не менее одного года по профессии электромонтера по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики с более низким (предшествующим) разрядом 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III		
				B/02.4	Восстановление работоспособности устройств релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС					
	Электромонтер по ремонту аппаратуры технологической и режимной автоматики ГЭС/ГАЭС (4 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	4	C/01.4	Техническое обслуживание устройств режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие среднего профессионального образования по программам подготовки квалифицированных рабочих по профилю подтверждаемой квалификации. 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее одного года по профессии электромонтера по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики с более низким (предшествующим) разрядом 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III	5 лет	Электромонтер по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики 5–6 разряда, ЕТКС электроэнергетики, раздел «Ремонт оборудования электростанций и сетей», § 28–29
				C/02.4	Восстановление работоспособности устройств режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС					

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Инженер по обслуживанию устройств и комплексов релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (6 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	6	D/01.6	Техническое обслуживание устройств и комплексов релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования по профилю подтверждаемой квалификации 2. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования (непрофильное) 2. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III	5 лет	Инженер по релейной защите и автоматике, Инженер по релейной защите и автоматике 2 категории, ЕКС электроэнергетики
				D/02.6	Оперативное обслуживание устройств и комплексов релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС					
	Инженер по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (6 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 г. № 132н	6	D/01.6	Техническое обслуживание устройств и комплексов релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования по профилю подтверждаемой квалификации 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее двух лет в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защиты и противоаварийной автоматики	5 лет	Инженер по релейной защите и автоматике 1 категории, ЕКС электроэнергетики

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
								3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования (непрофильное) 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее двух лет в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защиты и противоаварийной автоматики 3. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 4. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III		
				D/02.6	Оперативное обслуживание устройств и комплексов релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС					
				D/03.6	Технический учет и анализ функционирования релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС					

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				D/04.6	Сопровождение технического перевооружения и реконструкции устройств и комплексов релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС					
	Инженер по обслуживанию устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС (6 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	6	E/01.6	Техническое обслуживание устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования по профилю подтверждаемой квалификации 2. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования (непрофильное) 2. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III	5 лет	Инженер по релейной защите и автоматике, Инженер по релейной защите и автоматике 2 категории, ЕКС электроэнергетики

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				E/02.6	Оперативное обслуживание устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС					
	Инженер по эксплуатации устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС (6 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	6	E/01.6	Техническое обслуживание устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования по профилю подтверждаемой квалификации 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее двух в организациях электроэнергетики в области эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования (непрофильное) 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее двух лет в организациях электроэнергетики в области эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики 3. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподго-	5 лет	Инженер по релейной защите и автоматике 1 категории, ЕКС электроэнергетики
				E/02.6	Оперативное обслуживание устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС					
				E/03.6	Технический учет и анализ функционирования режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС					
				E/04.6	Сопровождение технического перевооружения и реконструкции устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС					

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
								товки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 4. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже III		
	Инженер по расчету и выбору параметров настройки и алгоритмов функционирования релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (6 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	6	F/01.6	Расчет электрических параметров аварийных и ненормальных режимов электрооборудования ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования по профилю подтверждаемой квалификации 2. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже II Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования (непрофильное) 2. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже II	5 лет	Инженер по релейной защите и автоматике, ЕКС электроэнергетики
				F/02.6	Расчет параметров настройки и выбор алгоритмов функционирования РЗА ГЭС/ГАЭС					

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Мастер по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (7 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	7	J/01.7	Организация обслуживания устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования по профилю подтверждаемой квалификации 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее трех лет на инженерно-технических и руководящих должностях в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защиты и противоаварийной автоматики 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже IV Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования (непрофильное) 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее трех лет на инженерно-технических и руководящих должностях в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защиты и противоаварийной автоматики 3. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 4. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже IV	5 лет	Начальник участка по ремонту энергетического оборудования, зданий и сооружений, ЕКС электроэнергетики
				J/02.7	Организация деятельности подчиненных работников по обслуживанию устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС					

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Ведущий инженер по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (7 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	7	G/01.7	Сопровождение технического обслуживания устройств и комплексов релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования не ниже уровня магистратуры или специалитета по профилю подтверждаемой квалификации 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее трех лет в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защиты и противоаварийной автоматики 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже IV Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования не ниже уровня магистратуры или специалитета (непрофильное) 2. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 3. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее трех лет в организациях электроэнергетики в области эксплуата-	5 лет	Ведущий инженер по релейной защите и автоматике, ЕКС электроэнергетики

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
								ции релейной защиты и противоаварийной автоматики 4. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже IV		
				G/02.7	Сопровождение оперативного обслуживания устройств и комплексов релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС					
				G/03.7	Повышение надежности устройств и комплексов релейной защиты, сетевой автоматики, противоаварийной автоматики, регистраторов аварийных событий и процессов ГЭС/ГАЭС					
	Ведущий инженер по эксплуатации устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС (7 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	7	H/01.7	Сопровождение технического обслуживания режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования не ниже уровня магистратуры или специалитета по профилю подтверждаемой квалификации 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее двух лет в организациях электроэнергетики в области эксплуатации режимной и технологической автоматики 3. Удостоверение о группе по электро-	5 лет	Ведущий инженер по релейной защите и автоматике, ЕКС электроэнергетики

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				H/02.7	Сопровождение оперативного обслуживания устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС			безопасности не ниже IV Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования не ниже уровня магистратуры или специалитета (непрофильное) 2. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 3. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее двух лет в организациях электроэнергетики в области эксплуатации режимной и технологической автоматики 4. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже IV		
				H/03.7	Повышение надежности устройств и комплексов режимной и технологической автоматики ГЭС/ГАЭС					
	Ведущий инженер по расчету и выбору параметров настройки и алгоритмов функционирования релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (6 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	7	I/01.7	Сопровождение расчетов электрических параметров аварийных и ненормальных режимов электрооборудования ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования не ниже уровня магистратуры или специалитета по профилю подтверждаемой квалификации 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее двух лет в должности инженера по расчетам РЗА I категории в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защи-	5 лет	Инженер по релейной защите и автоматике, Начальник участка по ремонту энергетического оборудования, зданий и сооружений ЕКС электроэнергетики

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
								ты и противоаварийной автоматики 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже II Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования не ниже уровня магистратуры или специалитета (непрофильное) 2. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 3. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее двух лет в должности инженера по расчетам РЗА I категории в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защиты и противоаварийной автоматики 4. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже II		
				I/02.7	Сопровождение выбора параметров настройки и выбор алгоритмов функционирования РЗА ГЭС/ГАЭС					
	Руководитель подразделения по расчету и выбору параметров настройки и алгоритмов функционирования релейной защиты и автоматики ГЭС/ГАЭС (6 уровень квалификации)	Работник по эксплуатации устройств и комплексов релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций, Приказ Минтруда России от 18.03.2021 № 132н	7	K/01.7	Организация расчета и выбора параметров настройки и алгоритмов функционирования РЗА ГЭС/ГАЭС	–	–	1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования не ниже уровня магистратуры или специалитета по профилю подтверждаемой квалификации 2. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта рабо-	5 лет	Начальник участка по ремонту энергетического оборудования, зданий и сооружений, ЕКС электроэнергетики

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
								ты не менее трех лет на инженерно-технических и руководящих должностях в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защиты и противоаварийной автоматики 3. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже II Или 1. Документ, подтверждающий наличие высшего образования не ниже уровня магистратуры или специалитета (непрофильное) 2. Документ, подтверждающий наличие дополнительного профессионального образования по программам профессиональной переподготовки в области эксплуатации устройств и комплексов РЗА ГЭС/ГАЭС 3. Документ(ы), подтверждающий(ие) наличие опыта работы не менее трех лет на инженерно-технических и руководящих должностях в организациях электроэнергетики в области эксплуатации релейной защиты и противоаварийной автоматики 4. Удостоверение о группе по электробезопасности не ниже II		
				K/02.7	Организация деятельности подчиненных работников по расчету и выбору параметров настройки и алгоритмов функционирования РЗА ГЭС/ГАЭС					

Новое в законодательстве

Приказ Минтруда России от 30.03.2021 № 162н
Об утверждении профессионального стандарта «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»

Целью профессиональной деятельности указанных специалистов является обеспечение надежного и эффективного функционирования оборудования подземных хранилищ газа. В перечень осуществляемых ими трудовых функций входит в числе прочего документационное обеспечение эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа, обеспечение эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа, оперативное управление эксплуатацией оборудования подземных хранилищ газа. Приводятся требования к образованию и обучению, особые условия допуска к работе. Признается утратившим силу Приказ Минтруда России от 26 декабря 2014 г. № 1163н, которым утвержден аналогичный стандарт. Настоящий Приказ вступает в силу с 1 сентября 2021 г. и действует до 1 сентября 2027 г.

Приказ Минтруда России от 30.03.2021 № 167н
Об утверждении профессионального стандарта «Машинист буровой установки»

Целью профессиональной деятельности данных специалистов является обеспечение качественного выполнения буровых работ с применением бурильной техники различного типа в условиях добывающей промышленности и строительства, при сейсморазведке и инженерных изысканиях, на открытых горных выработках и в шахтах. В перечень осуществляемых ими трудовых функций входит в числе прочего производственная эксплуатация и поддержание работоспособности буровой установки, буровых станков и бурового механизированного инструмента различного типа при выполнении горно-капитальных работ. Приведены требования к образованию и обучению, особые условия допуска к работе, другие характеристики. Признается утратившим силу Приказ Минтруда России от 22 декабря 2014 г. № 1093н, которым утвержден аналогичный стандарт, с внесенными в него изменениями.

Настоящий приказ вступает в силу с 1 сентября 2021 г. и действует до 1 сентября 2027 г.

Приказ Минтруда России от 31.03.2021 № 201н
Об утверждении профессионального стандарта «Слесарь технологических установок нефтегазовой отрасли»

Целью профессиональной деятельности данных специалистов является обеспечение надежного и эффективного функционирования оборудования технологических установок нефтегазовой отрасли. В перечень осуществляемых ими трудовых функций входит техническое обслуживание и ремонт (далее – ТОиР) простых и средней сложности элементов оборудования технологических установок нефтегазовой отрасли, ТОиР сложного оборудования технологических установок нефтегазовой отрасли, ТОиР уникального, комбинированного, крупногабаритного и экспериментального оборудования технологических установок нефтегазовой отрасли. Приводятся требования к образованию и обучению, к опыту практической работы, особые условия допуска к работе, другие характеристики. Признается утратившим силу Приказ Минтруда России от 27 ноября 2014 г. № 944н, которым утвержден аналогичный стандарт.

Настоящий приказ вступает в силу с 1 сентября 2021 г. и действует до 1 сентября 2027 г.

Приказ МЧС России от 6.04.2021 № 200
Об утверждении свода правил СП 6.13130 «Системы противопожарной защиты. Электроустановки низковольтные. Требования пожарной безопасности»

Свод правил устанавливает требования к питанию электроприемников, линиям связи, электрооборудованию систем противопожарной защиты зданий и сооружений. Свод правил предназначен для применения при проектировании и монтаже низковольтного электрооборудования систем противопожарной защиты вновь строящихся и реконструируемых зданий и сооружений.

Настоящий свод правил взаимосвязан с требованиями ГОСТ Р 50571-5-56-2013 Электроустановки низковольтные. Часть 5-56. Выбор и монтаж электрооборудования. Системы обеспечения безопасности.

Свод правил вводится в действие через 6 месяцев со дня издания настоящего приказа. Со дня его введения в действие признается утратившим силу приказ МЧС России от 21.02.2013 № 115 «Об утверждении свода правил СП 6.13130 «Системы противопожарной защиты. Электрооборудование. Требования пожарной безопасности».

Федеральный закон от 20.04.2021 № 99-ФЗ
О внесении изменения в главу 55 Трудового кодекса Российской Федерации

Определены особенности регулирования труда работников в сфере электроэнергетики, теплоснабжения, в области промышленной безопасности, безопасности гидротехнических сооружений. Так, уста-

новлено, в частности, что к трудовой деятельности в сфере электроэнергетики допускаются лица, прошедшие у работодателя подготовку к выполнению трудовых функций и получившие у него подтверждение их готовности к выполнению трудовых функций, прошедшие аттестацию по вопросам безопасности в сфере электроэнергетики, а в случаях, предусмотренных федеральными законами, также аттестацию в области промышленной безопасности, аттестацию по вопросам безопасности гидротехнических сооружений.

В случае прохождения работниками обучения по охране труда, инструктажа по охране труда и проверки знания указанными работниками требований охраны труда в рамках подготовки к аттестации и аттестации указанных работников или подготовки и подтверждения готовности к работе в соответствии с установленным настоящим Федеральным законом порядком дополнительные обучение по охране труда, инструктаж по охране труда и проверка знания требований охраны труда в порядке, установленном статьей 225 ТК РФ, не требуются.

Наряду с прохождением аттестации, подготовки и получением подтверждения готовности к работе для подтверждения соответствия квалификации работников, осуществляющих деятельность в сфере электроэнергетики или сфере теплоснабжения, профессиональным стандартам или квалификационным требованиям может проводиться независимая оценка квалификации.

Приказ Минтруда России от 22.04.2021 № 274н
Об утверждении профессионального стандарта «Специалист в области охраны труда»

С 1 сентября 2021 г. вступает в силу новый профстандарт «Специалист в области охраны труда». Основная цель вида профессиональной деятельности: профилактика несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний, снижение уровня воздействия (устранение воздействия) на работников вредных и/или опасных производственных факторов, управление профессиональными рисками. Предусмотрены в том числе требования к образованию и обучению, к опыту практической работы, особые условия допуска к работе.

Приказ действует до 1.09.2027. Признан утратившим силу аналогичный Приказ Минтруда России от 4.08.2014 № 524н.

Приказ Минприроды России от 22.04.2021 № 277
О внесении изменений в Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 31 июля 2018 г. № 341 «Об утверждении Порядка формирования и ведения перечня методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками»

В порядок ведения перечня методик расчета выбросов вредных веществ в атмосферный воздух стационарными источниками внесены изменения. В целях обеспечения возможности определения величин выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух расчетными методами пункт 2 Приказа № 341 дополнен подпунктом 2.1, позволяющим включить в Перечень сведения о ранее разработанных и применяющихся в настоящее время методиках.

Методические рекомендации по проведению аттестации аварийно-спасательных служб, аварийно-спасательных формирований, спасателей и граждан, приобретающих статус спасателя, на право ведения работ по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод и территориального моря Российской Федерации.
Утверждены Межведомственной комиссией по аттестации аварийно-спасательных служб, аварийно-спасательных формирований и спасателей, протокол № 2, 22.04.2021

Рекомендован порядок проведения аттестации аварийно-спасательных служб и формирований, спасателей и граждан, приобретающих статус спасателя, на право ведения работ по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Методические рекомендации разработаны в целях формирования единого подхода органами, осуществляющими аттестацию аварийно-спасательных служб, аварийно-спасательных формирований, спасателей и граждан, приобретающих статус спасателя и аттестуемыми к проведению аттестации на право ведения работ по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории РФ, за исключением внутренних морских вод и территориального моря РФ.

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Наилучшие доступные технологии водоподготовки, водоснабжения, водоотведения и водоочистки .
- Механические, электрические, биологические и химические методы очистки воды.
- Примеры внедрения различного оборудования для водоподготовки, водоочистки и водоснабжения на предприятиях энергетики, металлургии, химической, нефтегазовой и других отраслей.
- Повышение качества воды, доочистка. Замкнутые системы водопользования.
- Проектирование и эксплуатация канализационных очистных сооружений.
- Инновационные решения для трубопроводных систем. Полимерные трубы.
- Решение проблем накипеобразования, коррозии и биообрастания в системах водопользования.
- Непрерывный экологический мониторинг воды на промышленных предприятиях.
- Анализ качества воды - от индикаторных полосок до современных спектрофотометров.
- Отечественные и зарубежные расходомеры.
- Автоматизация систем водоснабжения, водоподготовки и водоочистки.
- Антикоррозионная защита зданий и оборудования водоочистных сооружений.
- Современные теплообменники, насосы, арматура, компенсаторы, градирни.

УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ «ВОДА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

1. Руководители и специалисты предприятий энергетики, металлургии, нефтегазовой, химической, целлюлозно-бумажной, цементной и других отраслей - Технические директора, Главные инженеры, Главные энергетики, Главные механики, Начальники ремонтных служб, Начальники цехов водоподготовки и водоочистки, Начальники технических и проектно-конструкторских отделов промышленных предприятий, Главные экологи и Начальники отделов охраны окружающей среды, Ответственные за эксплуатацию, строительство и реконструкцию водозаборов, трубопроводов, установок и систем водоподготовки, водоочистки, водоснабжения, канализации, водоотведения.
2. Руководители и сотрудники водоканалов.
3. Руководители и ведущие специалисты инжиниринговых, проектных и монтажных организаций.
4. Руководители и ведущие специалисты компаний - разработчиков и производителей материалов, приборов и оборудования для систем водопользования, водоподготовки, водоочистки.

ОРГАНИЗАТОР КОНФЕРЕНЦИИ - ООО «ИНТЕХЭКО»

- более 10 лет опыта организации выставок и конференций;
- более 80 организованных мероприятий;
- более 10000 делегатов конференций;
- свыше 30 стран - география компаний участников.

www.intecheco.ru admin@intecheco.ru +7 (905) 567-8767

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ ДОКЛАДОВ:

- Актуальные задачи, программные и технические средства для автоматизации предприятий.
- Информационно-управляющие системы промышленной автоматизации (АСУТП, АСОДУ, ERP, CRM, MES, АСКУЭ, АИИСКУЭ, ПАЗ, РЗА, SCADA и смежные направления).
- Решения для повышения автоматизации, эффективности и безопасности предприятий.
- Практический опыт автоматизации предприятий электроэнергетики, металлургии, машиностроения, нефтегазовой, цементной, химической и других отраслей промышленности.
- Автоматизированные системы мониторинга, учета и контроля технологических процессов.
- Автоматизация электроснабжения предприятий. Системы энергоменеджмента.
- Отечественные и зарубежные контрольно-измерительные приборы: расходомеры, газоанализаторы, пылемеры, спектрометры, дефектоскопы, толщиномеры, системы виброконтроля и вибродиагностики.
- Системы экологического мониторинга.
- Программные средства поддержки проектирования, измерений и испытаний.
- Теория и практика управления информационной безопасностью.

ВАРИАНТЫ УЧАСТИЯ:

Докладчик

Место для стенда

Участник

УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ:

К участию в конференции приглашаются: Главные инженеры, Главные метрологи, Главные энергетики, Технические директора, Директора по информационным технологиям, руководители и ведущие специалисты отделов автоматизации, АСУ, АСУТП, ТАИ, КИПиА, ИТ, ПТО предприятий энергетики, машиностроения, металлургии, химической, нефтегазовой, цементной и других отраслей промышленности, эксперты в области автоматизации и информационной безопасности, разработки АСУТП, САПР, АСКУЭ, ERP, CRM, MES-систем, руководители IT компаний, поставщиков и производителей контрольно-измерительных приборов, инжиниринговых и сервисных компаний.

www.intecheco.ru admin@intecheco.ru +7 (905) 567-8767

МИЭЭ приглашает на обучение

Московский институт энергобезопасности и энергосбережения приглашает на дистанционное и очно-заочное обучение с предоставлением рассрочки и скидок от 30 % до 50 % с выдачей диплома по следующим программам профессиональной переподготовки:

- Эксплуатация электрооборудования
- Эксплуатация тепловых энергоустановок и оборудования
- Эксплуатация энергоустановок и оборудования в сфере электро- и теплоэнергетики
- Проектирование электроустановок зданий и сооружений
- Энергосбережение
- Испытания низковольтного оборудования
- Управление охраной труда
- Управление охраной труда и инспектирование электроустановок
- Управление охраной труда и инспектирование электрических и тепловых установок

Обучение осуществляется в электронной информационно-образовательной среде института с возможностью обучаться в любом месте и в любое время.

Система дистанционного обучения МИЭЭ включает учебно-методические и справочные материалы, систему тренировочных и контрольных заданий, систему тестирования, систему оценивания, обширный справочный пакет (на базе образовательных программ бакалавриата по направлениям подготовки), общение с профессорско-преподавательским составом, поддержку и сопровождение тьютора.

Также Учебный центр МИЭЭ осуществляет обучение по курсам: «Электромонтажник», «Сварщик», «Сантехник».

Информация:

mieen.ru/dpo/prof_perepodgotovka

mieen.ru/sveden/education

Контакты:

Email: info@mieen.ru

Тел.: 8 (916) 807-4369 (Аванесов Валерий Михайлович)

АВТОРАМ

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСЕЙ

в журнал «Энергобезопасность и энергосбережение», входящий в Перечень ведущих рецензируемых журналов ВАК

• Текстовые материалы принимаются в виде документов MS Word, формат страницы А4, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по ширине страницы.

• Рисунки, графики и диаграммы со всеми необходимыми обозначениями должны прилагаться отдельными файлами в формате .jpg или .tif и упоминаться в тексте под теми же номерами позиций и названиями. Рисунки не должны содержать мелких несущественных деталей.

• Единицы измерения физических величин, входящих в формулы, должны быть указаны в соответствии с Международной системой (СИ). Формулы выполняются с помощью редактора формул Word. В статье приводится минимальное количество формул, характеризующих основные результаты.

• **Статья должна иметь следующую структуру:**
– название статьи;
– краткая аннотация;
– ключевые слова (просьба присылать название, аннотацию и ключевые слова также и на английском языке);
– текст статьи (состояние вопроса, актуальность, суть материала, оценка практической и научной ценности, выводы);
– список использованной литературы (обязательно).

• Список литературы приводится в порядке последовательности ссылок в тексте и оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008.

• Объем научной статьи не должен превышать 10 страниц А4 вместе с графическими материалами.

• В обязательном порядке указывается полная информация об авторе (фамилия, имя и отчество, ученая степень, ученое звание, место работы и должность, информация об окончании вуза и защите диссертации, домашний адрес с индексом, телефоны).

Статьи следует направлять по e-mail: zernes_04@mail.ru (Зернес Светлане Павловне).
Более подробно о подготовке рукописей читайте на сайте журнала www.endf.ru.

РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ

УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ РЕКЛАМНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЖУРНАЛЕ

Реклама в журнале «Энергобезопасность и энергосбережение» – самый надежный и быстрый способ донести информацию о вашей компании, продукте или услуге до специалистов энергетической отрасли, то есть до ваших потенциальных клиентов. Для читателей мы являемся авторитетным источником проверенных и научно обоснованных данных.

Разворот обложки	60 000 руб.	Визитка с информацией о фирме	3 500 руб.
2-я страница обложки	40 000 руб.	Имиджевая статья	6 000 руб. за полосу
3-я страница обложки	35 000 руб.	Реклама на полях страницы:	
4-я страница обложки	40 000 руб.	1 страница	10 000 руб.
Блок (2 полосы)	25 000 руб.	2 страницы	14 000 руб.
Блок, полоса	15 000 руб.	3 страницы	16 000 руб.
Блок, 1/2 полосы	8 000 руб.	Вложение рекламных листовок	20 000 руб.
Блок, 1/4 полосы	5 000 руб.	Вложение рекламных брошюр	30 000 руб.
Реклама на обложке (анонс статьи)	8 000 руб.	Также мы предлагаем размещение рекламы на нашем сайте. Подробнее: www.endf.ru	

По вопросам размещения рекламы обращайтесь по тел.: (495) 652-24-07 или по e-mail: redaktor@endf.ru

Дорогие читатели!

Агентство «Роспечать» сообщило о прекращении своей деятельности по каталожной подписке на журналы и газеты.

Оставайтесь с нами!
Вы можете подписаться на наш журнал следующими способами:

➢ **Подписка напрямую в редакции**

Стоимость 4200 р., включая НДС и доставку.

Подписка оформляется как для физических, так и для юридических лиц, начиная с любого номера, в любой момент. Просто напишите на email: **redaktor@endf.ru** или заполните форму на сайте **endf.ru**

➢ **Каталог «Деловая пресса»**

Сайт delpress.ru, индекс журнала 09896DP

➢ **Каталог «Пресса по подписке»**

Сайт akc.ru, индекс журнала И82020

➢ **Агентство «Урал-Пресс»**

Сайт ural-press.ru

➢ **Электронная библиотека elibrary.ru**

Представлены электронные версии всех выпусков журнала. Можно приобрести любые статьи отдельно или в составе выпусков.

Будем благодарны вам за поддержку нашего издания.
Подписчики печатной версии получат электронную бесплатно.

Спасибо, что вы у нас есть!

Новые и архивные выпуски журнала – в интернет-магазине на нашем сайте

www.endf.ru