

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

6
НОЯБРЬ – ДЕКАБРЬ
2015

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

Электроэнергетический совет СНГ,
Министерство образования Республики Беларусь,
Министерство образования и науки Российской Федерации

Журнал включен в базу данных РИНЦ

22 декабря – День энергетика

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Сергей И. И., Пономаренко Е. Г., Климкович П. И., Долин А. П., Пота-
чиц Я. В.** Расчет электродинамической стойкости проводов воздушных линий 5
- Сафарян В. С., Геворгян С. Г.** Определение параметров схемы замещения
асинхронной машины 20
- Кривонос В. Е., Василенко С. В.** Влияние запыленной среды на срок служ-
бы обмоток статора асинхронных двигателей 35

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Романюк В. Н., Муслина Д. Б.** Развитие энергоиспользования линий непре-
рывного крашения на предприятиях легкой промышленности 41
- Грачев О. Е., Неуймин В. М., Настека Д. В.** Повышение эффективности ре-
монтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения техно-
логий газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки 55
- Кухоренко А. Н.** Методика расчета экономической эффективности инвариант-
ной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла 62
- Манего С. А., Бумай Ю. А., Хорунжий И. А., Трофимов Ю. В.** Анализ тепло-
вых свойств линеек светодиодов методом переходных электрических процессов . . . 74
- Седнин В. А., Чичко А. А.** Оценка значимости влияния термодинамических
факторов на эффективность работы твердооксидных топливных элементов 87

ЮБИЛЕИ

- К 100-летию со дня рождения.** Профессор Александр Митрофанович Леонков 98
- Перечень статей, опубликованных в журнале «Энергетика» в 2015 г.**
- I. Тематический указатель 99**
- II. Именной указатель 103**

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

*С. Н. АСАМБАЕВ (Алматы, Республика Казахстан),
В. ВУЙЦИК (Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволен, Словацкая Республика),
В. А. ДЖАНГИРОВ (Москва, Российская Федерация),
К. В. ДОБРЕГО (Минск, Республика Беларусь) (зам. главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Марцуполь, Республика Украина),
П. В. ЖУКОВСКИ (Люблин, Республика Польша),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Минск, Республика Беларусь),
НГО ТУАН КИЕТ (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербург, Российская Федерация),
ЛУ ЧЖУН-У (Шэньян, Китайская Народная Республика),
Б. К. МАКСИМОВ (Москва, Российская Федерация),
А. С. МИХАЛЕВ (Минск, Республика Беларусь),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Минск, Республика Беларусь),
Е. С. МИШУК (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Киев, Республика Украина),
Э. Н. САБУРОВ (Архангельск, Российская Федерация),
А. С. САУХАТАС (Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Минск, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Минск, Республика Беларусь) (зам. главного редактора),
Б. С. СОРОКА (Киев, Республика Украина),
В. А. СТРОЕВ (Москва, Российская Федерация),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (Минск, Республика Беларусь),
Е. В. ТОРОПОВ (Челябинск, Российская Федерация),
Е. УШПУРАС (Каунас, Литовская Республика),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (Минск, Республика Беларусь),
Ю. ЭКМАНИС (Рига, Латвийская Республика)*

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 5 февраля 2010 г.
Регистрационный номер 1257**

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 15.12.2015. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз.
Дата выхода в свет 2015. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный
технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон +375 17 292-65-14.
e-mail: energy@bntu.by

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2015

PROCEEDINGS OF THE CIS HIGHER
EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA 6
NOVEMBER – DECEMBER
2015

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

CIS Electric Power Council,
Ministry of Education of the Republic of Belarus,
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

The Journal is included in RSCI

22nd December – Day of Power Engineer

C O N T E N T S

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Sergey I. I., Panamarenka Y. G., Klimkovich P. I., Dolin A. P., Potachits Y. V. Electrodynamics Stability Computations for Flexible Conductors of the Aerial Lines	5
Safaryan V. S., Gevorgyan S. G. Ascertainment of the Equivalent Circuit Parameters of the Asynchronous Machine	20
Krivososov V. E., Vasilenko S. V. Dusty Environment Impact on Lifespan of the Induction Motors Stator Winding	35

HEAT POWER ENGINEERING

Romaniuk V. N., Muslina D. B. Energy Recovery for Continuous Dyeing Process in Textile Industry Enterprises	41
Grachev O. E., Neuimin V. M., Nasteka D. V. Increasing the Efficiency of Repairing, Manufacturing and Operation of TPP Equipment by the Technology of Thermal Spray Coating and Laser Cladding	55
Kuchorenko A. N. Economic Efficiency Design Procedure for the Automatic Water-Level Regulating Invariant System in the Boiler Shell	62
Manego S. A., Bumi Yu. A., Khorunzhii I. A., Trofimov Yu. V. Analysis of Thermal Properties of the LED-Lines by Method of the Transient Electric Processes	74
Sednin V. A., Chichko A. A. Effect Significance Assessment of the Thermodynamical Factors on the Solid Oxide Fuel Cell Operation	87

JUBILEES

To 100-Anniversary. Professor Alexander Leonkov	98
--	----

List of Papers published in “Energetika” Journal, 2015

I. Thematic index	99
II. Name index	103

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

*S. N. ASAMBAEV (Almaty, Republic of Kazakhstan),
V. VUITSIK (Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Zvolen, Slovak Republic),
V. A. JANGIROV (Moscow, Russian Federation),
K. V. DOBREGO (Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
I. V. ZHEZHELENKO (Mariupol, Republic of Ukraine),
P. V. ZHUKOVSKY (Lublin, Republic of Poland),
A. S. KALINICHENKO (Minsk, Republic of Belarus),
NGO TUAN KIET (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
A. I. KIRILLOV (St. Petersburg, Russian Federation),
LU CHZHUN-U (Shenyang, People's Republic of China),
B. K. MAKSIMOV (Moscow, Russian Federation),
A. S. MIKHALEV (Minsk, Republic of Belarus),
A. A. MIKHALEVICH (Minsk, Republic of Belarus),
E. S. MISHUK (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
O. G. PENYAZKOV (Minsk, Republic of Belarus),
E. N. PISMENNYI (Kyiv, Republic of Ukraine),
E. N. SABUROV (Arkhangelsk, Russian Federation),
A. S. SAUKHATAS (Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Minsk, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
B. S. SOROKA (Kyiv, Republic of Ukraine),
V. A. STROEV (Moscow, Russian Federation),
V. I. TIMOSHPOLSKY (Minsk, Republic of Belarus),
E. V. TOROPOV (Chelyabinsk, Russian Federation),
E. USHPURAS (Kaunas, Republic of Lithuania),
B. M. KHROUSTALEV (Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (Minsk, Republic of Belarus),
Yu. EKMANIS (Riga, Republic of Latvia)*

Executive Secretary of Editorial Staff V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5th
Reg. No 1257**

Typesetting and makeup are made in editorial office
of journals "Energetics" and "Science & Technique"

Passed for printing 15.12.2015. Dimension of paper 60×84¹/₈. Offset paper.
Printed on risograp. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 250 copies. Date of publishing 2015. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65 Nezavisimosty Avenue

УДК 621.315/316.351.064

Расчет электродинамической стойкости проводов воздушных линий

И. И. Сергей¹⁾, Е. Г. Пономаренко¹⁾, П. И. Климкович¹⁾,
А. П. Долин²⁾, Я. В. Потачиц¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

²⁾Московский энергетический институт (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. На воздушных линиях применяются многопроволочные алюминиевые провода. Из-за их гибкой конструкции в результате электродинамического действия токов короткого замыкания могут происходить недопустимые взаимные сближения и даже схлестывания фазных проводников друг с другом. Ускоренное движение проводов, вызванное действием импульса электродинамических усилий при коротком замыкании, сопровождается ударными динамическими нагрузками, действующими на провода, изоляционные и опорные конструкции воздушных линий. Интенсивность электродинамического действия токов короткого замыкания на гибкие проводники воздушных линий зависит от величины токов короткого замыкания. Для исследования электродинамической стойкости проводов воздушных линий, расположенных по вершинам произвольного треугольника в пролетах большой длины, принимается расчетная модель в виде гибкой растяжимой нити, масса которой равномерно распределена по ее длине. При такой расчетной модели провод под действием внешних сил принимает форму, обусловленную эпюрой приложенных сил, и не сопротивляется изгибу и кручению. Задача расчета начальных условий сводится к решению уравнений статки гибкой нити. Закон движения краевых точек проводов установлен из совместного решения уравнений динамики проводов и конструктивных элементов воздушных ЛЭП. На основе предлагаемого алгоритма на кафедре «Электрические станции» БНТУ разработана компьютерная программа LINEDYS+, которая по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам, например SAMSEF. Для расчета начальных условий модифицировали компьютерную программу механического расчета гибких проводников MR 21. Электродинамическое взаимодействие проводов при коротком замыкании оценивается с учетом конструктивных элементов воздушных линий, гололедных и ветровых нагрузок, реальных характеристик короткого замыкания. Компьютерные программы снабжены простым и понятным пользовательским интерфейсом и могут создавать автоматические отчеты. Оценка достоверности расчетов по разработанной компьютерной программе выполнялась сопоставлением экспериментальных и расчетных данных для опытного пролета французской государственной компанией Electricite de France.

Ключевые слова: динамика токоведущих конструкций, электродинамическая стойкость, максимальные тяжения, силы сжатия, математическое моделирование

Для цитирования: Расчет электродинамической стойкости проводов воздушных линий / И. И. Сергей [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 5–19

Адрес для переписки

Сергей Иосиф Иосифович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-58
power.st@bntu.by

Address for correspondence

Sergey Joseph I.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-58
power.st@ bntu.by

Electrodynamic Stability Computations for Flexible Conductors of the Aerial Lines

I. I. Sergey¹⁾, Y. G. Panamarenka¹⁾, P. I. Klimkovich¹⁾,
A. P. Dolin²⁾, Y. V. Potachits¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

²⁾Moscow Energy Institute (Moscow, Russian Federation)

Abstract. In aerial transmission lines aluminium multiwire conductors are in use. Owing to their flexible design the electrodynamic effect of short circuit currents may lead to intolerable mutual rendezvous and even cross-whipping of the phase conductors. The increasing motion of the conductors caused by effect of the short-circuit electrodynamic force impulse is accompanied by the dynamic load impact affecting the conductors, insulating and supporting constructions of the aerial lines. Intensity of the short-circuit currents electrodynamic impact on the flexible conductors depends on the short circuit current magnitude. For research into electrodynamic endurance of the conductors of the aerial lines located at the vertices of arbitrary triangle with spans of a large length, the authors assume the conductor analytical model in the form of a flexible tensile thread whose mass is distributed evenly lengthwise the conductor. With this analytical model, by the action of the imposed forces the conductor assumes the form conditioned by the diagram of applied external forces, and resists neither bending nor torsion. The initial conditions calculation task reduces to solving the flexible thread statics equations. The law of motion of the conductor marginal points comes out of the conjoint solution of dynamic equations of the conductor and structural components of the areal electric power lines. Based on the proposed algorithm, the researchers of the Chair of the Electric Power Stations of BNTU developed a software program LINEDYS+, which in its characteristics yields to no foreign analogs, e. g. SAMSEF. To calculate the initial conditions they modified a software program computing the flexible conductor mechanics named MR 21. The conductor short-circuit electrodynamic interaction estimation considers structural elements of the areal lines, ice and wind loads, objective parameters of the short circuit. The software programs are accommodated with the simple and intelligible user interface and can produce automatic reports. For the computation certainty valuation of the developed software program, comparison of the experimental and design values was performed on an engineering prototype span of the French state-owned company Electricite de France.

Keywords: dynamics of current-carrying structures, electrodynamic stability, maximum tensions, compressional forces, mathematical modeling

For citation: Sergey I. I., Panamarenka Y. G., Klimkovich P. I., Dolin A. P., & Potachits Y. V. Electrodynamic Stability Computations for Flexible Conductors of the Aerial Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 5–19 (in Russian)

На воздушных линиях (ВЛ) применяются многопроволочные алюминиевые провода со стальным сердечником. В стадии освоения находятся композитные провода со стеклопластиковым сердечником. Из-за их гибкой конструкции в результате электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) могут происходить недопустимые взаимные сближения и даже схлестывания фазных проводников друг с другом или с заземленными конструкциями ВЛ. Случаи нарушения электродинамической стойкости гибких токопроводов наблюдались в России на подстанции 500 кВ «Тихорецкая» при схлестывании фаз гибкого токопровода на стороне 10 кВ автотрансформатора связи (предписание ПП-06-09 РАО ЕС России). Недопустимое сближение фаз гибкого токопровода 10 кВ имело место

в схеме электроснабжения ОАО «Могилевхимволокно» (по данным службы энергетика завода и РУП «БелНИПИэнергопром»). Причем повреждение наступило при токе 13 кА и продолжительности КЗ $t_k = 1,2$ с. В соответствии с ПУЭ [1] наименьшее расстояние между фазами в момент их наибольшего сближения при КЗ не должно быть меньше нормированного значения по рабочему напряжению (табл. 1). Согласно ГОСТ [2], оценка электродинамической стойкости проводов должна проводиться по двум условиям:

Таблица 1

$U_{\text{ном}}, \text{ кВ}$	$A_{\text{ф-ф.доп}}, \text{ м}$
35	0,25
110	0,45
220	0,95
330	1,40

$$\begin{aligned} S_{\text{max}} &\leq S_{\text{доп}}; \\ T_{\text{max}} &\leq T_{\text{доп}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где S_{max} , T_{max} , $S_{\text{доп}}$, $T_{\text{доп}}$ – соответственно максимальные и допустимые отклонения и тяжения гибких проводов при КЗ.

В общем случае проверка проводов на недопустимое сближение и схлестывание при КЗ выполняется по максимальной сумме отклонений проводов соседних фаз в момент их наибольшего сближения [3]

$$A - (S_1 + S_2 + 2r_p) \geq A_{\text{ф-ф.доп}} k, \quad (2)$$

где A , $A_{\text{ф-ф.доп}}$ – расстояние и допустимое расстояние между соседними фазами в режиме климатических нагрузок, предшествующем КЗ; r_p – единичный радиус-вектор; S_1 , S_2 – отклонения проводов соседних фаз в момент времени их наибольшего сближения [3].

Отклонения S_1 и S_2 не равны между собой не только при расположении фаз на опоре по треугольнику, но даже при горизонтальном расположении фаз из-за разного влияния ветра на движение проводов. Поэтому условие (2) в общем виде имеет следующий вид:

$$\min(\overline{R_i} - \overline{R_j}) - 2r_p \geq A_{\text{ф-ф.доп}}, \quad (3)$$

где R_i , R_j – радиусы-векторы мгновенного расположения i -го и j -го проводов в точке их наибольшего сближения ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$; $i \neq j$).

В простом случае, когда провода соседних фаз двигаются по идентичным траекториям навстречу друг другу, условие их недопустимого сближения имеет вид

$$A - 2(Y_{2\text{max}} + r_p) \geq A_{\text{ф-ф.доп}}, \quad (4)$$

где $Y_{2\text{max}}$ – максимальное отклонение фазы при сближении проводов после отключения КЗ, м.

Ускоренное движение проводов, вызванное действием импульса электродинамических усилий (ЭДУ) при КЗ, сопровождается ударными динамическими нагрузками, действующими на провода, изоляционные и опорные конструкции ВЛ, способными вызвать нарушение механической прочности элементов ВЛ. По условию электродинамической стойкости ВЛ

Таблица 2

Тип и марка провода	$T_{\text{доп}}$, даН
АС-120/27	3960
АС-150/24	4350
АС-150/34	4950
АС-185/24	4995
АС-185/29	5365
АС-240/39	6960
АС-300/48	8700
АС-400/22	8600
АС-400/56	10800
АС-400/93	13200
АС-500/64	13500

максимальные тяжения проводов при КЗ не должны превышать их допустимых значений. Допустимые тяжения определяются пределом прочности на растяжение проводов с учетом коэффициента запаса $k_3 = 0,5$ (табл. 2) [2].

Интенсивность электродинамического действия токов КЗ на гибкие проводники ВЛ зависит от величины токов КЗ. Согласно ПУЭ проверка электродинамической стойкости проводов необходима, если действующее значение началь-

ного периодического тока КЗ превышает 20 кА [1]. По данным ведущих белорусских проектных организаций, уровни токов КЗ на стороне 110 и 330 кВ достигают 35–40 кА. Ожидается их рост в связи со строительством Белорусской АЭС. В электрических сетях 110–220 кВ Московского региона только благодаря стационарному делению сети (более 100 точек) токи КЗ находятся на уровне 30–40 кА, а не 130–140 кА, при $U_{\text{ном}} = 110$ кВ и 70–80 кА при $U_{\text{ном}} = 220$ кВ, при отсутствии деления [4]. Длины пролетов при указанных напряжениях достигают 400 м, а стрелы провеса 10 м, что более чем в два раза превышает междуфазные расстояния. Это повышает риск опасного сближения и схлестывания проводов ВЛ при КЗ.

Для исследования электродинамической стойкости проводов ВЛ, расположенных по вершинам произвольного треугольника в пролетах большой длины, принимается расчетная модель провода в виде гибкой растяжимой нити, масса которой равномерно распределена по длине провода. При такой расчетной модели провод под действием внешних сил принимает форму, обусловленную эпюрой приложенных сил, и не сопротивляется изгибу и кручению. Уравнения движения провода, представленного гибкой нитью, записанные в нормальном виде, имеют следующий вид [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial s} \frac{\partial \bar{R}}{\partial s} + T \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s^2} + \bar{P} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где $\bar{R}$ – радиус-вектор произвольной точки провода в пролете, м; s – дуговая координата провода, м; $\bar{P}$ – вектор распределенной внешней нагрузки на единицу длины провода, в состав которой кроме электродинамической

нагрузки от токов КЗ могут входить весовая, гололедная, ветровая и другие нагрузки, Н/м; T – модуль тяжения, Н; t – время, с; ρ – масса единицы длины провода с учетом его растяжения, кг/м.

После преобразования (5) к нормальному виду получены векторно-параметрические уравнения движения проводов, записанные в проекциях на оси координат [5]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} &= \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial x}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_x^*; \\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= b^2 \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial y}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_y^*; \\ \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= b^2 \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial z}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_z^*,\end{aligned}\quad (6)$$

где

$$\lambda^2 = \frac{T}{\rho_0(1+e)}; \quad b^2 = \frac{a^2 - \lambda^2}{(1+e)^2}; \quad a^2 = \frac{1}{\rho_0 \alpha_y (1 + \alpha_t \vartheta)};$$

e – относительное удлинение элемента провода в результате растяжения и нагрева при КЗ; α_y – коэффициент упругого удлинения провода; ϑ – текущая температура провода при и после КЗ, °C; P^* – распределенная внешняя нагрузка на единицу длины провода, Н/м.

Вычисление ЭДУ между проводами фаз, взаимное пространственное положение и форма которых в каждый момент времени описываются уравнениями их движения, производится по формуле Био, Савара и Лапласа, записанной в векторно-параметрической форме [5]. В общем виде в системе n гибких проводов ВЛ суммарные ЭДУ на единицу длины k -го провода определяются по выражению

$$\bar{F}_k = \frac{\sum_{j=1}^n d\bar{F}_{kj}}{ds_k}, \quad (7)$$

где ds_k – длина элемента k -го провода, м; $d\bar{F}_{kj}$ – ЭДУ на элемент длины k -го провода от j -го (при $k \neq j$); при $k = j$ – собственные ЭДУ, обусловленные криволинейностью провода, Н/м.

ЭДУ, действующие на элемент k -го проводника в поле j -го, определяются по выражению (рис. 1)

$$d\bar{F}_{kj} = \frac{\mu_0 i_k i_j}{4\pi} \left[d\bar{s}_k \int_{l_j} \frac{d\bar{s}_j \bar{R}_{jk}}{|\bar{R}_{jk}|^3} \right], \quad (8)$$

где i_k, i_j – мгновенные значения токов во взаимодействующих проводниках, А.

Мгновенные значения токов КЗ в трехфазной системе вычисляются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \left(\sin(\omega t + \alpha) - \sin \alpha e^{-\beta t} \right); \\ i_B &= I_m \left(\sin \left(\omega t + \alpha - \frac{2}{3} \pi \right) - \sin \left(\alpha - \frac{2}{3} \pi \right) e^{-\beta t} \right); \\ i_C &= I_m \left(\sin \left(\omega t + \alpha + \frac{2}{3} \pi \right) - \sin \left(\alpha + \frac{2}{3} \pi \right) e^{-\beta t} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где I_m – амплитуда периодической составляющей тока КЗ, А; α – фаза включения тока; $\beta = 1/T_a$ – показатель затухания аperiodической составляющей тока КЗ, 1/с; T_a – постоянная времени цепи КЗ, с.

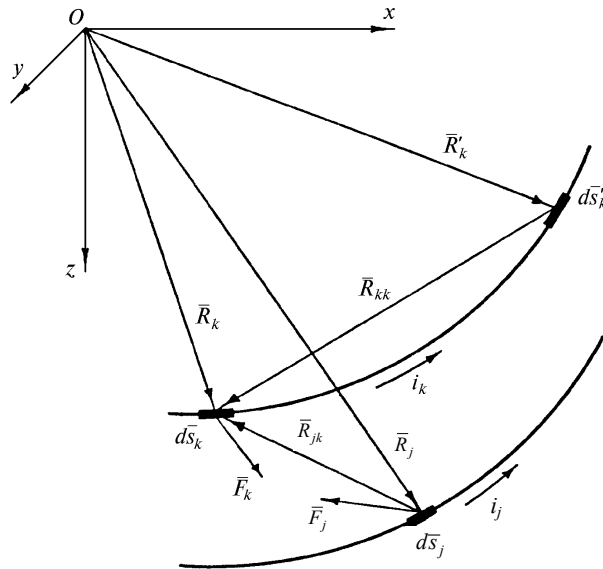


Рис. 1. К расчету ЭДУ в системе гибких проводов

Fig. 1. On EDF estimation in a system of flexible wires

Для выделения единственного решения уравнений движения проводов нужны начальные и краевые условия задачи. Начальные условия для уравнений движения проводов определяются их положением при $t = 0$, краевые – заданными координатами концов провода в полете. Задача расчета начальных условий сводится к решению уравнений статики гибкой нити, полученных из уравнений динамики [2], в которых производные по времени принимаются равными нулю. На кафедре «Электрические станции» БНТУ разработан векторно-параметрический метод расчета равновесного положения проводов ВЛ при их различном пространственном расположении под действием весовых, гололедных и ветровых распределенных

нагрузок. Гололедные и ветровые нагрузки рассчитываются в соответствии с требованиями ПУЭ [1].

Закон движения краевых точек проводов установлен из совместного решения уравнений динамики проводов и конструктивных элементов воздушных ЛЭП. Математическое описание движения проводов, их начального и равновесного положений до КЗ, упругой податливости опорных конструкций позволило сформулировать краевую задачу динамики проводов ВЛ. Для решения нелинейных дифференциальных уравнений динамики (6) проводов используются численный разностный метод и неявная схема (рис. 2) [6].

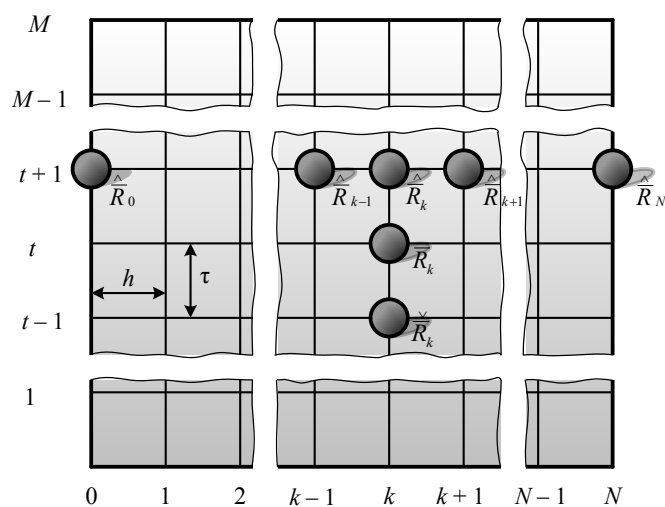


Рис. 2. Сетка для численного решения уравнений движения проводов по неявной схеме

Fig. 2. The grid for numerical calculation of the wires movement equations by implicit scheme

На основе вышеизложенного алгоритма на кафедре «Электрические станции» БНТУ разработана компьютерная программа LINEDYS+ [7], которая по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам, например SAMSEF. Для расчета начальных условий модифицировали компьютерную программу механического расчета гибких проводников MR 21. Электродинамическое взаимодействие проводов при КЗ оценивается с учетом конструктивных элементов ВЛ, гололедных и ветровых нагрузок, реальных характеристик КЗ и неуспешного автоматического повторного включения (АПВ). Компьютерные программы снабжены простым и понятным пользовательским интерфейсом и имеют возможность создания автоматических отчетов. Оценка достоверности расчетов по разработанной компьютерной программе выполнялась сопоставлением экспериментальных и расчетных данных для опытного пролета французской государственной компанией Electricite de France [8–10] (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Сравнение расчетных и экспериментальных данных
для опытного пролета Electricite de France длиной 230 м
Computation and experimental data comparison
for the Electricite de France engineering prototype 230 m span

Фаза Параметр	А			В		
	Опыт	Расчет	Расхожде- ние, %	Опыт	Расчет	Расхожде- ние, %
$T_{2\max}$, кН	60,00	59,41	-1,0	—	66,23	—
$T_{3\max}$, кН	77,00	82,64	7,3	79,0	71,40	-9,6
$y_{1\max}$, м	5,00	5,65	13,0	5,0	5,55	10,9
$y_{2\max}$, м	3,90	3,97	1,7	4,0	4,64	16,0
$z_{\max}$, м	2,77	3,33	20,0	2,0	1,77	-11,7

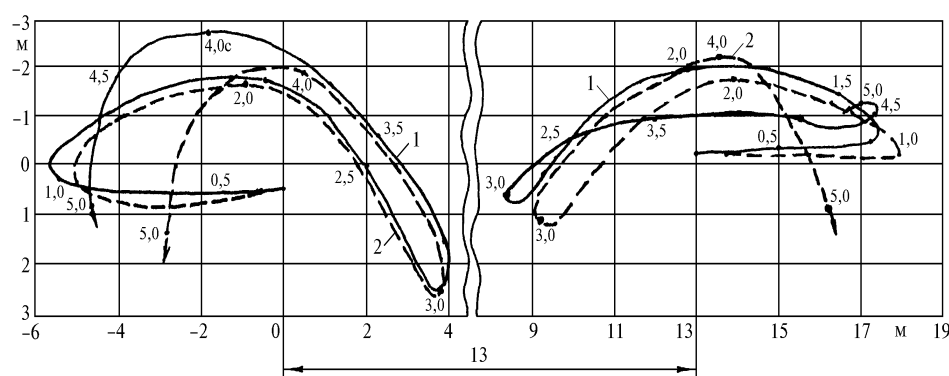


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных траекторий движения проводов опытного пролета Electricite de France длиной 230 м: 1 – расчет по программе; 2 – опыт; провод – 2xASTER-570; длина пролета – 230 м; расстояние между фазами – 13 м; ток КЗ – 54 кА; продолжительность КЗ – 0,35 с; тяжение проводов: фаза А – 41 кН; фаза В – 48 кН

Fig. 3. Comparison of calculated and experimental conductors motion trajectories of the Electricite de France engineering prototype 230 m span: 1 – computer program evaluation; 2 – experiment; conductor – 2xASTER-570; span length – 230 m; phase-to-phase clearance – 13 m; SC (short circuit) current – 54 kA; SC duration – 0,35 sec.; conductor tension: phase A – 41 kN; phase B – 48 kN

Результаты расчетов по программе LINEDYS+ также хорошо согласуются с литературными данными (табл. 4, рис. 4). Для теоретического анализа французскими исследователями в [8–10] использована компьютерная программа CONEX, в которой реализован алгоритм численного разностного решения уравнений движения абсолютно гибкой упругой нити. Идентичность реализованных в программах LINEDYS и CONEX алгоритмов обуславливает высокую степень совпадения результатов.

Таблица 4

Сопоставление результатов расчета
по компьютерным программам LINEDYS+ и CONEX
Computation results comparison
by computer programs LINEDYS+ and CONEX

№ П/П	CONEX		LINEDYS+		$\Delta T, \%$	$\Delta a, \%$
	$T_{\max}, \text{кН}$	$a_{\min}, \text{М}$	$T_{\max}^A (T_{\max}^B), \text{кН}$	$a_{\min}, \text{М}$		
1	33	2,74	32,39 (32,99)	2,33	-1,9	-15,0
2	42	0,40	42,70 (42,85)	0,42	2,0	4,0
3	38	1,70	36,37 (37,44)	1,72	-1,5	1,1
4	38	1,10	35,52 (35,32)	1,27	-6,5	15,4
5	44	1,50	42,83 (41,83)	1,41	-2,6	-6,0
6	35	2,30	34,44 (34,44)	1,62	-1,6	-29,5
7	42	0,00	43,02 (43,02)	0,00	2,4	—
8	38	1,50	38,34 (38,31)	1,23	0,9	-18,0
9	48	0,30	48,47 (47,32)	0,38	0,9	26,6

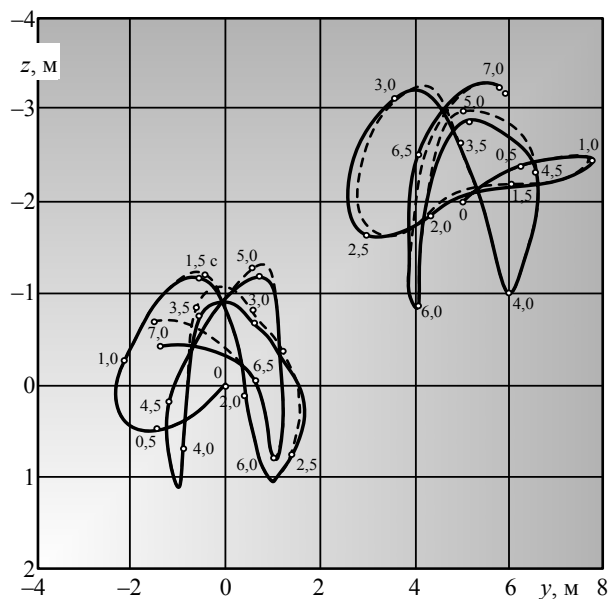


Рис. 4. Траектории движения средних точек проводов: длина пролета – 200 м;
провод – ASTER-570; тяжение – 20 кН; ток двухфазного КЗ – 30 кА;
продолжительность – 0,12 с; — — — LINEDYS+; — — — CONEX

Fig. 4. The conductor centerpoints motion trajectories: span length – 200 m;
conductor – ASTER-570; tangential tension – 20 kN; two-phase SC current – 30 kA;
duration – 0,12 sec.; — — — LINEDYS+; — — — CONEX

В качестве примера выполнен расчет движения проводов воздушной линии 110 кВ на типовых опорах ПБ 110-11. Анализ траекторий движения фазных проводников показывает, что результирующее ЭДУ действует на фазу В в горизонтальной плоскости, поэтому траектория движения фазы

B – горизонтальная. Наибольшими вертикальными движениями при КЗ характеризуется фаза A , так как под действием результирующего ЭДУ трехфазного КЗ происходит значительный подскок этой фазы в направлении уменьшения тяжения. Аналогичные движения описывает и фаза A . Однако в этом случае результирующие ЭДУ действуют на растяжение провода фазы A и величина подскока провода после отключения КЗ невелика. Зато для фазы A из-за деформации провода ЭДУ на стадии свободного движения наблюдаются значительные горизонтальные перемещения, повышающие риск опасного сближения фаз между собой.

При расположении проводов по вершинам треугольника на типовых опорах ВЛ 110–220 кВ в траекториях их движения при КЗ могут преобладать как вертикальные, так и горизонтальные перемещения в зависимости от фазы включения КЗ (рис. 5, 6).

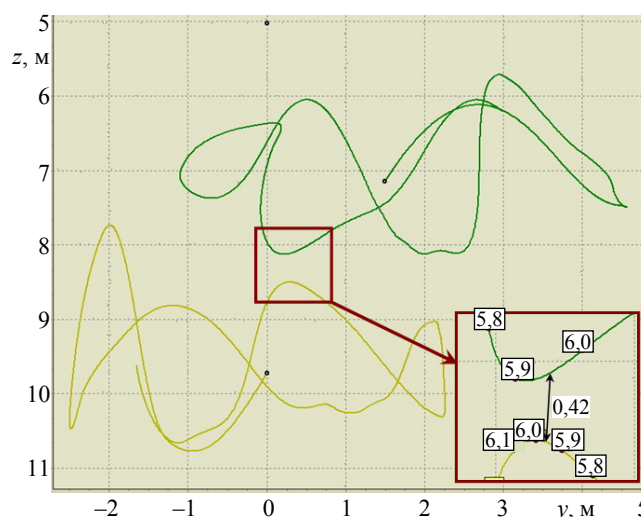


Рис. 5. Траектории движения проводов в точке, удаленной на 195 м от левой опоры, при двухфазном КЗ

Fig. 5. Conductors motion trajectories in the point outlying 195 m from the left pylon in a two-phase SC

После отключения КЗ в последующих циклах свободных колебаний, несмотря на значительное междуфазное расстояние, могут иметь место недопустимые сближения проводников. Тяжесть электродинамического действия усиливается в цикле неуспешного АПВ и при срабатывании резервных защит. Наибольшие отклонения и тяжения проводов наблюдаются при трехфазном КЗ и фазе включения напряжения, равной 160° . Несмотря на меньшие токи КЗ на ВЛ, их электродинамическое действие оказывается более сильным, а электродинамическая стойкость проводов – более низкой, чем для распределительных устройств электростанций и подстанций. Это в первую очередь связано с непропорциональным увеличением длины пролетов ВЛ по сравнению с шинными пролетами открытого распределительного устройства (ОРУ) при близких значениях междуфазных расстоя-

ний. На ВЛ $\frac{l}{a} \approx \frac{300}{4,5} = 67$ при $f_{0*} = 2-3\%$ ($f_0 = 6-19$ м). В то же время для ОРУ 110 кВ отношение $\frac{l}{a} \approx \frac{30}{3} = 10$ при $f_{0*} = 3-5\%$ ($f_0 = 1,0-1,5$ м). В результате при близких углах отклонения плоскостей провода абсолютные отклонения и сближения фаз значительно отличаются друг от друга.

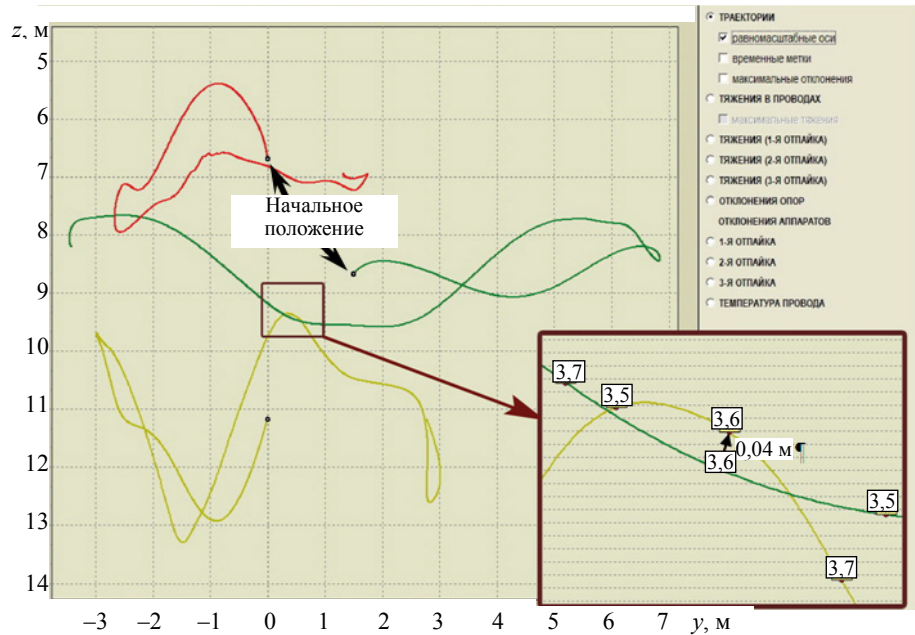


Рис. 6. Траектории движения проводов в средней точке пролета при трехфазном КЗ

Fig. 6. Conductors motion trajectories at the span centerpoint in a three-phase SC

Из-за разности высот подвеса проводов ВЛ, закрепленных на типовых опорах при КЗ, их максимальное сближение происходит не в середине пролета, а ближе к опорам (рис. 7). Объяснить это явление можно, представив провода ВЛ параболическими жесткими конструкциями, которые движутся навстречу друг другу. Схлестывание таких проводов произойдет в двух точках, равноудаленных от центра пролета. Чем больше стрела провеса, тем ближе эти точки будут к опорам. В общем случае, учитывая множество факторов, влияющих на процесс движения проводников, затруднительно произвести какой-либо приближенный анализ с целью выработки заключения об электродинамической стойкости. Поэтому для получения достоверной оценки электродинамической стойкости проводов ВЛ следует использовать компьютерную программу LINEDYS+, позволяющую определять токи электродинамической стойкости проводов ВЛ при различных физико-механических параметрах проводов и геометрических характеристиках пролетов, достоверность расчетов по которой подтверждена опытными данными.

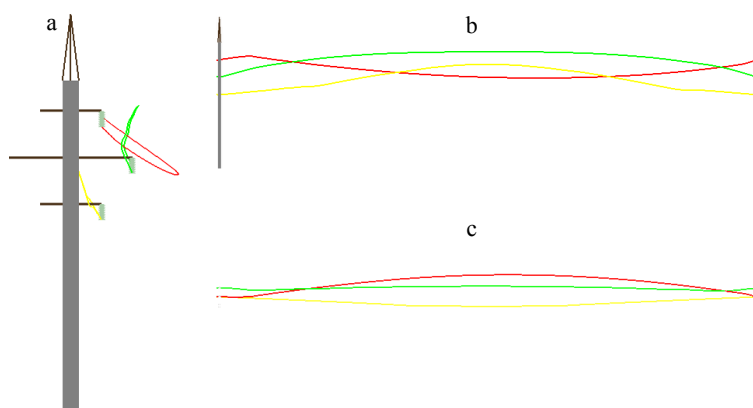


Рис. 7. Недопустимое сближение проводников не в середине пролета:
 а – вид пролета с торца; б – сбоку; с – сверху

Fig. 7. Conductors intolerable rendezvous not in the middle of the span:
 а – the span end view; б – side view; с – top view

Расчетная осциллограмма тяжения проводов при КЗ (рис. 8) содержит характерные всплески тяжения, которым соответствуют участки траекторий движения, когда после отключения КЗ силы тяжести, инерции и растяжения проводов действуют в одном направлении и провод проходит наиболее низкую точку траектории движения. Указанные пики тяжения при токах электродинамической стойкости 20–25 кА, найденные по условию недопустимого сближения, не превышают $T_{\text{доп}}$ (табл. 2).

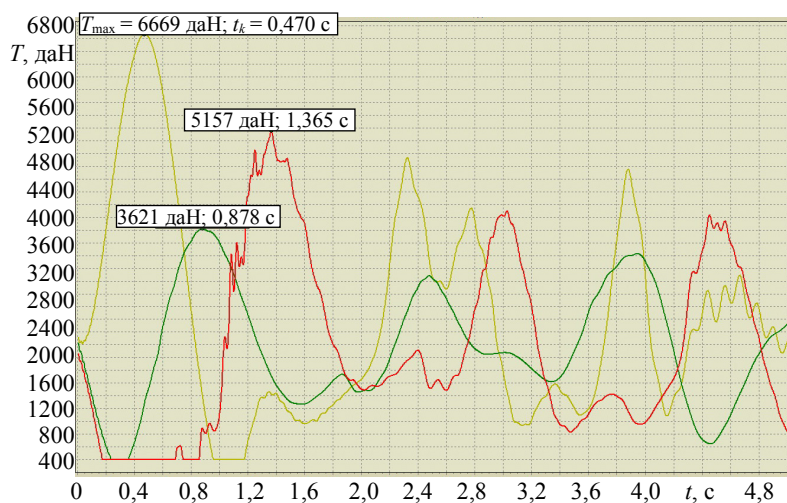


Рис. 8. Изменение тяжения во времени

Fig. 8. Tension alteration in time

Как видно из рис. 8, пиковые тяжения проводов при КЗ носят кратковременный характер и быстро уменьшаются после отключения КЗ. Поэтому подстановка в условие электродинамической стойкости максимального тяжения требует отдельного рассмотрения. Анализ результатов расчета параметров динамики проводов 220 кВ показывает их более высокую элек-

тродинамическую стойкость по сравнению с ВЛ 110 кВ (токи электродинамической стойкости выше в два и более раз, рис. 9–11).

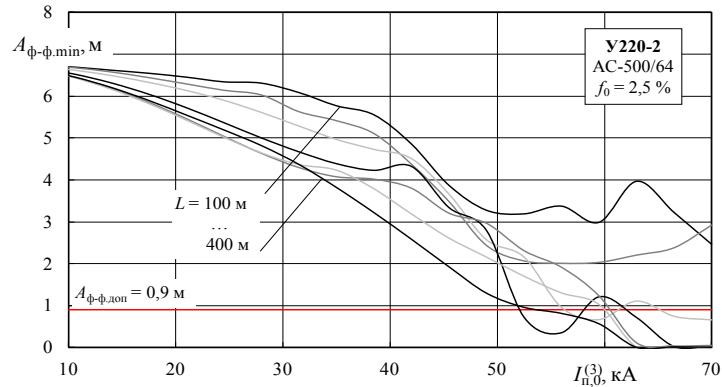


Рис. 9. Сближение проводников в зависимости от тока КЗ для разных длин пролета

Fig. 9. Conductor approach as a function of SC current for various span lengths

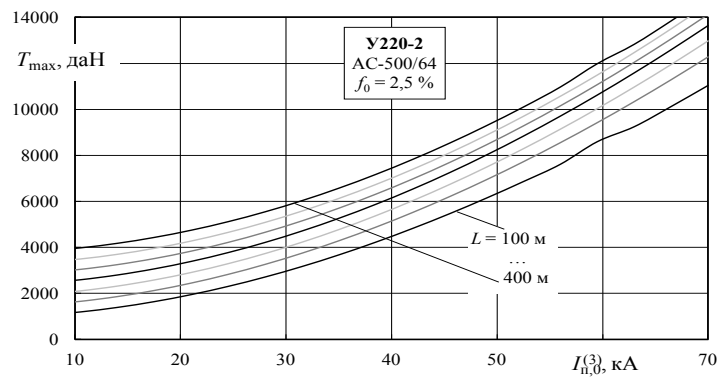


Рис. 10. Максимальные тяжения в проводах в зависимости от тока КЗ для разных длин пролета

Fig. 10. Maximal tensions in conductors as function of SC current for various span lengths

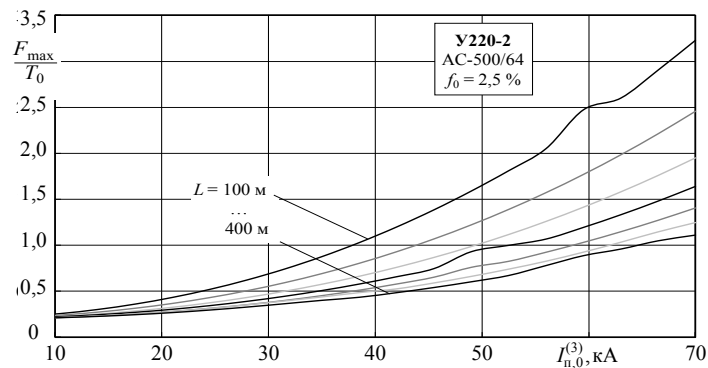


Рис. 11. Относительные максимальные усилия на подвесные гирлянды изоляторов в зависимости от тока КЗ для разных длин пролета

Fig. 11. Relative maximal stress on the suspension sets as function of SC current for various span lengths

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствован векторно-параметрический метод расчета электродинамической стойкости проводов воздушных линий, основанный на численном решении уравнений их движения как системы с распределенной массой с учетом их начального положения в одном из нормированных ПУЭ климатическом режиме и влияния упругих деформаций опорных конструкций воздушных линий.

2. Составлена компьютерная программа LINEDYS+, пригодная для оценки и анализа электродинамической стойкости проводов воздушных линий при их произвольном расположении на опоре воздушных линий в различных режимах короткого замыкания и в цикле неуспешного автоматического повторного включения.

3. Достоверность расчетов по компьютерной программе LINEDYS+ подтверждается сопоставлением результатов расчета с опытными данными Electricite de France в пролетах 200 и 230 м.

4. Выполнена оценка электродинамической стойкости воздушных линий 110–220 кВ с определением токов их электродинамической стойкости, которая может быть использована при реконструкции действующих и сооружении новых воздушных линий 110–220 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., перераб. и доп. М., 2007. 512 с.
2. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ Р 50254–92. Введ. 01.01.1994. М.: Госстандарт России, 1993. 57 с.
3. Сергей, И. И. Динамика гибких проводов электроустановок энергосистем: теория и вычислительный эксперимент: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / И. И. Сергей. Минск, 2000. 324 л.
4. Игнатов, В. В. К вопросу о методах ограничений токов короткого замыкания в энергосистеме / В. В. Игнатов, М. Ш. Миерихаимов, А. В. Шунтов // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 5. С. 94–103.
5. Сергей, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 252 с.
6. Пономаренко, Е. Г. Расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств с применением неявной схемы / Е. Г. Пономаренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 5. С. 34–45.
7. Разработка компьютерной программы расчета и проведение оценки электродинамической стойкости воздушных линий ОАО «МОЭСК» при росте уровней токов КЗ / И. И. Сергей [и др.]: отчет по НИР (заключительный). Минск: БНТУ, 2013. С. 73 с.
8. Dalle, B. Mechanical Effects of High Short Circuit Current on Overhead Lines / B. Dalle, P. Roussel // IEE Power Engineering Society, Winter Meet, Prepr. New York. N. Y., 1979. P. 1–5.
9. Influence of an Increase in Short-Circuit Currents on the Design of 400 kV Installations of the Electricite de France / Y. Thomas [et al.]. Paris, 1976. 20 p. (Preprint/CIGRE; 23–06).
10. Lilien, J. L. Comparison Between Experimental and Numerical Results on Flexible Conductors / J. L. Lilien. Paris, 1980. 10 p. (Preprint/CIGRE; 23–80 (WG–02) 18–IWD).

Поступила 31.08.2015 Подписана в печать 14.10.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. *Operational Code for Electrical Installations*. 7th ed., Revised and Enlarged. Moscow, 2007. 512 p. (in Russian).
2. State Standard R 50254–92. Closed-Circuit Faults in the Electrical Facilities. Calculation Techniques for the Closed-Circuit Currents Electrodynamic and Thermic Impact. Moscow, GosStandard of Russia, 1993. 57 p. (in Russian).
3. Sergey I. I. (2000) *Dinamika Gibkikh Provodov Elektroustanovok Energosistem: Teoriia i Vychislitel'nyi Eksperiment. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Dynamics of Flexible Wires in Electrical Installations of the Power Network: Theory and Computational Experiment. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk. 324 p. (in Russian).
4. Ignatov V. V., Miyerikhaimov M. Sh., & Shuntov A. V. (2009) On the Issue of the Methods of Limiting Closed-Circuit Currents in the Electric Power System. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 5, 94–103 (in Russian).
5. Sergey I. I. & Strelyuk M. I. (1999) *Dynamics of Wires in the Power Network Electric Installations During Closed-Circuit Faults: Theory and Computational Experiment*. Minsk, VUZ-UNITY. 252 p. (in Russian).
6. Ponomarenko Ye. G. (2008) Computation of the Distributing Gear Flexible Busbar Electrodynamic Endurance with Employment of the Implicit Scheme. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 5, 34–45. (in Russian).
7. Sergey I. I. [et al.]. *Designing a Software Program for Electrodynamic Endurance Calculation and Estimation Execution for the JSC 'MOESK'-Aerial Lines at Increasing Levels of the Short-Circuit Currents*. Research Memorandum (Concluding). Minsk: BNTU, 2013. 73 p. (in Russian, Unpublished).
8. Dalle B., & Roussel P. (1979) Mechanical Effects of High Short Circuit Current on Overhead Lines. *IEEE Power Engineering Society, Winter Meet, Prepr.* New York, 1–5.
9. Thomas Y. [et al.]. (1976) *Influence of an Increase in Short-Circuit Currents on the Design of 400 kV Installations of the Electricite de France*. Paris. 20 p. (Preprint/CIGRE; 23–06).
10. Lilien J. L. (1980) *Comparison Between Experimental and Numerical Results on Flexible Conductors*. Paris. 10 p. (Preprint/CIGRE; 23–80 (WG–02) 18–IWD).

Received: 31 August 2015

Accepted: 14 October 2015

Published online: 16 December 2015

УДК 621.311

Определение параметров схемы замещения асинхронной машины

В. С. Сафарян¹⁾, С. Г. Геворгян¹⁾

¹⁾ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики» (Ереван, Республика Армения)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Рассматривается вопрос определения параметров схемы замещения асинхронной машины экспериментальным и аналитическим путем с использованием справочных данных. Исследование переходных процессов асинхронных машин требует наличия параметров схемы замещения (активные сопротивления, индуктивности и взаимная индуктивность контуров статора и ротора), с помощью которых формируется математическая модель переходного процесса. В справочниках не приводятся эти параметры, вместо них даны номинальные параметры (активная мощность, напряжение, скольжение, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности), а также отношение пусковых и номинальных токов и моментов. В известных работах по определению параметров схем замещения асинхронной машины задачи до конца не решены или решены с допущениями. В статье даны экспериментальное и аналитическое определения параметров схемы замещения асинхронной машины. Экспериментальное определение основано на результатах двух измерений, а при аналитическом задаче сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений. Исследованы свойства эквивалентных входных сопротивлений асинхронной машины, приведены кривые зависимостей входных сопротивлений от скольжения. Представлена математическая модель для аналитического определения параметров схемы замещения асинхронной машины, которая является системой нелинейных уравнений и требует произвольного задания одного из параметров ротора. Показано, что для экспериментального определения параметров схемы замещения асинхронной машины требуется проведение измерений напряжения, тока и активной мощности в статорной цепи при двух различных скольжениях и произвольное задание одного из параметров ротора. Доказано, что дополнительное измерение механического момента не снимает произвольности выбора параметра ротора. Установлено, что в двигательном режиме существует критическое скольжение, при котором ток статора получается наименьшим.

Ключевые слова: асинхронная машина, схема замещения, справочные данные, математическая модель, инвариантность

Для цитирования: Сафарян, В. С. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины / В. С. Сафарян, С. Г. Геворгян // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 20–34

Адрес для переписки

Сафарян Виталий Сафарович
ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики»
просп. Мясникян, д. 5/1,
0025, г. Ереван, Республика Армения
Тел.: +374 10 55-96-59
sevakgevotgyan@yandex.ru

Address for correspondence

Safaryan Vitaliy S.
Research Studies Institute
of Power Engineering
Myasnikyan prosp., 5/1, 0025,
Yerevan, Republic of Armenia
Tel.: +374 10 55-96-59
sevakgevotgyan@yandex.ru

Ascertainment of the Equivalent Circuit Parameters of the Asynchronous Machine

V. S. Safaryan¹⁾, S. G. Gevorgyan¹⁾

¹⁾Research Studies Institute of Power Engineering (Erevan, Republic of Armenia)

Abstract. The article considers experimental and analytical determination of the asynchronous machine equivalent-circuit parameters with application of the reference data. Transient processes investigation of the asynchronous machines necessitates the equivalent circuit parameters (resistance impedance, inductances and coefficient of the stator-rotor contours mutual inductance) that help form the transitory-process mathematical simulation model. The reference books do not provide those parameters; they instead give the rated ones (active power, voltage, slide, coefficient of performance and capacity coefficient) as well as the ratio of starting and nominal currents and torques. The noted studies on the asynchronous machine equivalent-circuits parametrization fail to solve the problems ad finem or solve them with admissions. The paper presents experimental and analytical determinations of the asynchronous machine equivalent-circuit parameters: the experimental one based on the results of two measurements and the analytical one where the problem boils down to solving a system of nonlinear algebraic equations. The authors investigate the equivalent asynchronous machine input-resistance properties and adduce the dependence curvatures of the input-resistances on the slide. They present a symbolic model for analytical parameterization of the asynchronous machine equivalent-circuit that represents a system of nonlinear equations and requires one of the rotor-parameters arbitrary assignment. The article demonstrates that for the asynchronous machine equivalent-circuit experimental parameterization the measures are to be conducted of the stator-circuit voltage, current and active power with two different slides and arbitrary assignment of one of the rotor parameters. The paper substantiates the fact that additional measurement does not discard the rotor-parameter choice arbitrariness. The authors establish that in motoring mode there is a critical slide by which the stator current value turns out to be the minimum.

Keywords: asynchronous machine, equivalent circuit, reference data, symbolic model, invariance

For citation: Safaryan V. S., & Gevorgyan S. G. Ascertainment of the Equivalent Circuit Parameters of the Asynchronous Machine. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, 20–34 (in Russian)

В сетях с асинхронными машинами (АМ) для исследования переходных процессов необходимо учесть электромагнитные и электромеханические переходные процессы АМ [1–5]. В математической модели переходных процессов АМ исходными данными являются: U_s – напряжение статора; M_m – механический момент; R_s (R_r) – активное сопротивление статора (ротора); L_s (L_r) – индуктивность статора (ротора); L_m – взаимная индуктивность между обмотками фаз статора и ротора. В справочниках [5] не приводятся параметры схемы замещения, а даются такие, как [6]: U_s , P_n – номинальная мощность; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; η – КПД; $s_{кр}$, s_n – критическое и номинальное скольжение; $I_{пуск}/I_n$ ($M_{пуск}/M_n$) – отношение пускового и номинального токов (моментов); $M_{макс}/M_n$ – отношение максимального и номинального моментов и т. д. В этом случае возникает необходимость перехода от справочных данных к параметрам схемы замещения или определения их экспериментальным путем. Вопросам определения параметров схемы замещения АМ посвящен ряд работ, рассмотрим более характерные из них [7–11].

Усовершенствование метода синтеза параметров схемы замещения АМ из динамических режимов на базе аппаратно-цифрового комплекса регистрации аналоговых сигналов предлагается в [8]. С использованием теории подобия процесс подбора параметров сводится к оптимизационной задаче некоторой целевой функции, которая представляет собой среднеквадратичное отклонение мгновенных значений экспериментальных и расчетных значений результирующего вектора тока статора. Для определения расчетных значений результирующего вектора тока используется система дифференциальных уравнений АМ.

Для определения электромагнитных параметров АМ авторы [9] рассматривают Т-образную схему замещения и графики полного комплексного сопротивления и его составляющих, фазного сдвига в зависимости от частоты питающего напряжения. С использованием экспериментальных кривых и их аналитических описаний для определения частот, соответствующих характерным точкам кривых (минимумы, максимумы и т. д.), составляется ряд уравнений, позволяющих найти электромагнитные параметры АМ.

Работа [10] посвящена определению параметров схемы замещения АМ с короткозамкнутым ротором при несимметричном питании статора и неподвижном роторе. Сначала рассматривается переходный режим работы АМ при питании фазы статора А и В постоянным напряжением, затем – стационарный режим при питании тех же фаз статора синусоидальным напряжением. На основе проведенных опытов и допущений о равенстве индуктивных сопротивлений рассеяния статора и ротора составляется система из трех нелинейных уравнений для определения параметров АМ.

Авторы [11] предлагают безытерационную методику определения параметров АМ на основе данных каталога. Они избегают применения итерационных методов, считая их сложными для использования на практике, и призывают к разработке простой методики определения параметров АМ, доступной широкому кругу специалистов. В [11] применяются упрощенные аналитические выражения, что недопустимо в современных условиях исходя из возможностей вычислительной техники и методов прикладной математики. Отметим, что процессы (стационарные и переходные) АМ описываются нелинейными уравнениями и отказ от применения итерационных методов исследования недопустим.

Методы определения параметров схемы замещения АМ можно разделить по характеру:

- рассматриваемых процессов (использование стационарных [9–11] и динамических (переходных) процессов [8, 10]);
- питающего напряжения (использование переменного [8, 10, 11] и постоянного [10] напряжений, частотных характеристик [9]).

Работа, проведенная авторами данной статьи, отличается от перечисленных тем, что в ней приведены математические модели без упрощения

и доказана невозможность однозначного определения параметров схемы замещения аналитическим и экспериментальным путем.

Аналитические и экспериментальные методы определения параметров схемы замещения имеют свои преимущества и недостатки. В аналитическом методе трудно учитывать возможные изменения параметров АМ при ее длительной эксплуатации. Экспериментальный метод не имеет указанного недостатка, но зависит от точности полученных результатов в процессе проведения испытаний.

Целью исследований авторов являлось определение параметров схемы замещения АМ аналитическим и экспериментальным путем.

Результаты исследования

Схема замещения АМ [1] представлена на рис. 1.

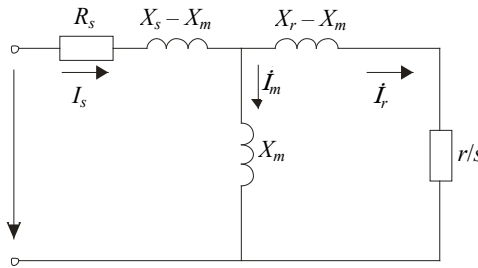


Рис. 1. Схема замещения АМ в стационарном режиме
 Fig. 1. The equivalent scheme of the AM in stationary mode

Для этой схемы:

$$Z_s = R_s + j(X_s - X_m); \quad Z_r = \frac{r}{s} + j(X_r - X_m); \quad Z_m = jX_m, \quad (1)$$

где $X_s = \omega_s L_s$, $X_r = \omega_s L_r$, $X_m = \omega_s L_m$ – соответствующие индуктивные сопротивления; ω_r , ω_s – угловая скорость вращения ротора и поля статора; $s = (\omega_s - \omega_r)/\omega_s$ – скольжение.

Эквивалентное полное сопротивление для схемы замещения согласно [1]

$$Z_{\text{экв}} = Z_s + \frac{Z_r Z_m}{Z_r + Z_m} = R_{\text{экв}} + jX_{\text{экв}}, \quad (2)$$

где

$$R_{\text{экв}} = R_s + \frac{X_m^2 \frac{r}{s}}{\left(\frac{r}{s}\right)^2 + X_r^2}; \quad X_{\text{экв}} = X_s - \frac{X_m^2 X_r}{\left(\frac{r}{s}\right)^2 + X_r^2}. \quad (3)$$

Исследуем некоторые свойства функций $R_{\text{экв}}$, $X_{\text{экв}}$ и $Z_{\text{экв}}$ в зависимости от скольжения.

Определим экстремальные точки $R_{\text{экв}}(s)$:

$$R'_{\text{экв}}(s) = \frac{\frac{X_m^2 r}{s^2} \left[\left(\frac{r}{s} \right)^2 - X_r^2 \right]}{\left[\left(\frac{r}{s} \right)^2 + X_r^2 \right]^2} = 0,$$

или

$$\left(\frac{r}{s} \right)^2 - X_r^2 = 0,$$

откуда

$$\begin{cases} s_{\text{кр}.R}^+ = \frac{r}{X_r}; \\ s_{\text{кр}.R}^- = -\frac{r}{X_r}. \end{cases} \quad (4)$$

В точке $s_{\text{кр}.R}^+$ функция $R_{\text{экв}}(s)$ принимает максимальное значение, а в точке $s_{\text{кр}.R}^-$ — минимальное:

$$\begin{cases} R_{\text{экв}}^{\text{max}} = R_s + \frac{X_m^2}{2X_r}; \\ R_{\text{экв}}^{\text{min}} = R_s - \frac{X_m^2}{2X_r}. \end{cases} \quad (5)$$

Очевидно, что $\lim_{s \rightarrow \pm\infty} R_{\text{экв}}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} R_{\text{экв}}(s) = R_s$.

Определим корни уравнения $R_{\text{экв}}(s) = 0$

$$R_s \left(\frac{r}{s} \right)^2 + X_m^2 \frac{r}{s} + R_s X_r^2 = 0. \quad (6)$$

Условие существования действительных решений квадратного уравнения (6) следующее:

$$X_m^2 - 2R_s X_r \geq 0. \quad (7)$$

При выполнении условия (7) формула (6) имеет два отрицательных корня, которые определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} s' &= \frac{2R_s r}{-X_m^2 + \sqrt{X_m^4 - 4R_s^2 X_r^2}}; \\ s'' &= \frac{2R_s r}{-X_m^2 - \sqrt{X_m^4 - 4R_s^2 X_r^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Поскольку оба корня отрицательны, условие $R_{\text{экв}}(s) = 0$ может обеспечиваться только в генераторном режиме.

Можно показать, что при выполнении (7): $s_{\text{кр},R}^- \in [s'', s']$ и $R_{\text{экв}}^{\min} \leq 0$.

Определим экстремальные точки $X_{\text{экв}}(s)$

$$X'_{\text{экв}}(s) = \frac{-X_m^2 X_r \frac{r}{s^2}}{\left[\left(\frac{r}{s}\right)^2 + X_r^2\right]^2} = 0.$$

Графики функций $R_{\text{экв}}(s)$ и $X_{\text{экв}}(s)$ приведены на рис. 2.

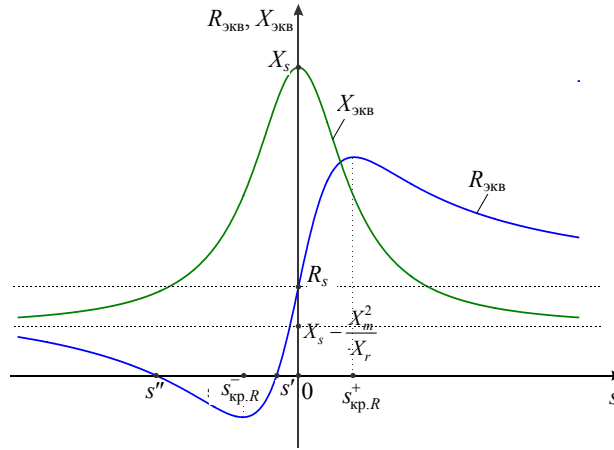


Рис. 2. Графики функций $R_{\text{экв}}(s)$ и $X_{\text{экв}}(s)$

Fig. 2. The graphs of functions $R_{\text{ekv}}(s)$ and $X_{\text{ekv}}(s)$

Функция $X_{\text{экв}} = X_{\text{экв}}(s)$ имеет экстремум (максимум) при $s = 0$,
 $X_{\text{экв}}(0) = X_s$, $\lim_{s \rightarrow \pm\infty} X_{\text{экв}}(s) = X_s - \frac{X_m^2}{X_r} > 0$.

Определим экстремальные точки $Y_{\text{экв}}(s)$:

$$Y'_{\text{экв}}(s) = \frac{R_{\text{экв}} R'_{\text{экв}} + X_{\text{экв}} X'_{\text{экв}}}{\sqrt{R_{\text{экв}}^2 + X_{\text{экв}}^2}} = 0,$$

или

$$R_s X_r^2 s^2 - r(X_m^2 - 2X_s X_r)s - R_s r^2 = 0.$$

Поскольку условие существования действительных решений последнего квадратного уравнения $X^2 + 4R_s^2 X_s^2 > 0$ всегда выполняется, то:

$$\begin{cases} s_{кр.Y}^+ = \frac{X + \sqrt{X^2 + 4R_s^2 X_s^2 r^2}}{2R_s X_r^2}; \\ s_{кр.Y}^- = \frac{X - \sqrt{X^2 + 4R_s^2 X_s^2 r^2}}{2R_s X_r^2}, \end{cases} \quad (9)$$

где $X = r(X_m^2 - 2X_s X_r) < 0$.

Из (9) следует, что $s_{кр.Y}^+ > 0$, $s_{кр.Y}^- < 0$. В точке $s_{кр.Y}^-$ функция $Y_{эКВ}(s)(Z_{эКВ}(s))$ принимает максимальное (минимальное) значение, а в точке $s_{кр.Y}^+$ – минимальное (максимальное). Графики $Z_{эКВ}(s)$ и $Y_{эКВ}(s)$ представлены на рис. 3.

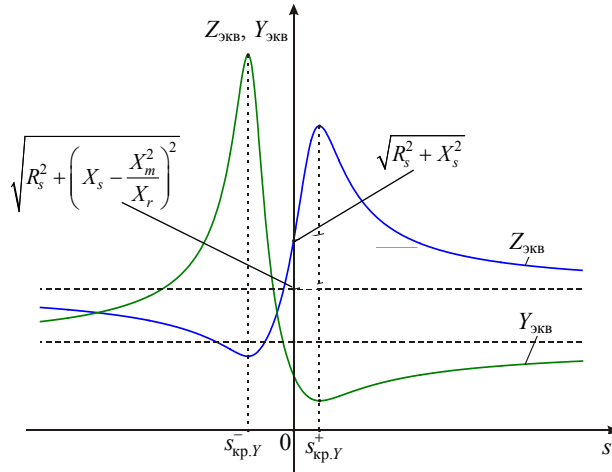


Рис. 3. Графики функций $Z_{эКВ}(s)$ и $Y_{эКВ}(s)$

Fig. 3. The graphs of functions $Z_{эКВ}(s)$ and $Y_{эКВ}(s)$

Пользуясь методом эквивалентного генератора, представим схему замещения на рис. 1 в виде эквивалентного генератора (рис. 4), где:

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_s}{Z_s + Z_m} Z_m; \quad (10)$$

$$Z_{эГ} = \frac{Z_s Z_m}{Z_s + Z_m} + j(X_r - X_m). \quad (11)$$

По схеме, представленной на рис. 4, имеем:

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{U}_x}{Z_{эГ} + r/s} = \frac{\dot{U}_x}{(R_{эГ} + r/s) + jX_{эГ}}; \quad (12)$$

$$\Delta P_r = I_r^2 \frac{r}{s} = \frac{U_x^2 r}{\left[(R_{\text{эГ}} + r/s)^2 + X_{\text{эГ}}^2 \right] s}, \quad (13)$$

где $R_{\text{эГ}} = R_s X_m^2 / (R_s^2 + X_s^2)$; $X_{\text{эГ}} = X_r - X_s X_m^2 / (R_s^2 + X_s^2)$.

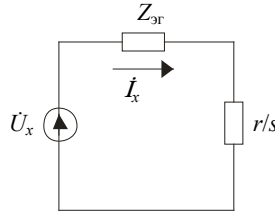


Рис. 4. Представление схемы замещения АМ в виде эквивалентного генератора

Fig. 4. Representation of the equivalent circuit of the AM in the form of equivalent generator

Определим условие передачи максимальной мощности от источника к приемнику с сопротивлением r/s . С этой целью, решив уравнение $\frac{d}{ds}(\Delta P_r) = 0$, найдем значение критического скольжения

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{r}{\sqrt{R_{\text{эГ}}^2 + X_{\text{эГ}}^2}} = \pm \frac{r}{Z_{\text{эГ}}}. \quad (14)$$

Подставляя значения критического скольжения (14) в (13), получим:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{max}}^+ = \frac{U_x^2}{2(R_{\text{эГ}} + Z_{\text{эГ}})}; \\ \Delta P_{\text{max}}^- = \frac{U_x^2}{2(R_{\text{эГ}} - Z_{\text{эГ}})}, \end{cases} \quad (15)$$

где ΔP_{max}^+ , ΔP_{max}^- – значение потери мощности при скольжениях $s_{\text{кр}}$ и $-s_{\text{кр}}$, причем $|\Delta P_{\text{max}}^-| > |\Delta P_{\text{max}}^+|$ ($\Delta P_{\text{max}}^- < 0$).

Решая уравнение $I_r'(s) = 0$, получим экстремальные точки функций $I_r(s)$. Функция имеет максимум при: $s_{\text{кр},R} = -\frac{r}{R_{\text{эГ}}}$, $I_r(s_{\text{кр},R}) = \frac{U_x}{X_{\text{эГ}}}$, а минимум при: $s_{\text{кр},R} = 0$, $I_r(0) = 0$, $\lim_{s \rightarrow \pm\infty} I_r(s) = \frac{U_x}{Z_{\text{эГ}}}$.

Поскольку ток статора определяется выражением $I_s = U_s Y_{\text{экв}}$, график функции $I_s(s)$ повторяет график $Y_{\text{экв}}(s)$. Из этого следует, что в двигательном режиме существует критическое скольжение $s_{\text{кр},Y}^- \neq 0$, при котором ток статора получается наименьшим.

Графики функций $I_s(s)$ и $I_r(s)$ представлены на рис. 5.

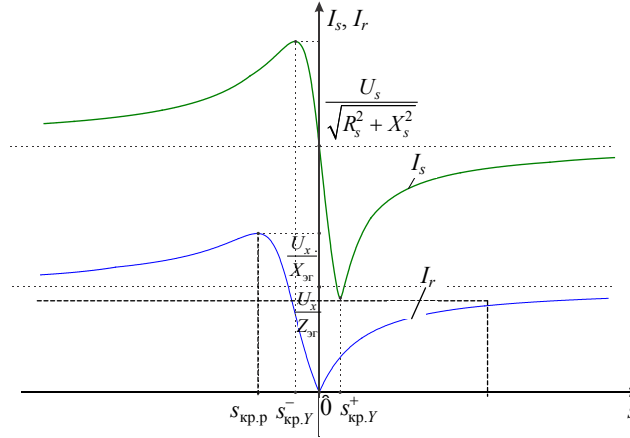

 Рис. 5. Графики функций $I_s(s)$ и $I_r(s)$

 Fig. 5. The graphs of functions $I_s(s)$ and $I_r(s)$

Определение параметров схемы замещения АМ аналитическим путем

Предполагая, что U_s , P , $\cos \varphi$, s_H , $I_{\text{пуск}}/I_H$, $M_{\text{пуск}}/M_H$ и M_{max}/M_H заданы, найдем параметры АМ.

В номинальном режиме $R_{\text{экв}}$ и $X_{\text{экв}}$ АМ можно определить следующими соотношениями:

$$R_{\text{экв}} = \frac{U_s^2}{S^2} P = \frac{U_s^2}{P^2 + (P \operatorname{tg} \varphi)^2} P; \quad X_{\text{экв}} = \frac{U_s^2}{S^2} Q = \frac{U_s^2}{Q^2 + (Q \operatorname{tg} \varphi)^2} Q,$$

где P , Q , S – активная, реактивная и полная мощность АМ в номинальном режиме соответственно.

Ток I_H можно определить из выражения

$$I_H = \frac{S}{U_s} = \frac{\sqrt{P^2 + P^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}}{U_s} = \frac{P}{U_s \cos \varphi}.$$

Учитывая соотношение

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_s}{\sqrt{\bar{R}_{\text{экв}}^2 + \bar{X}_{\text{экв}}^2}},$$

где $\bar{R}_{\text{экв}}$, $\bar{X}_{\text{экв}}$ – активное и реактивное сопротивление АМ в холостом ходе, для определения параметров схемы замещения АМ получим уравнение

$$\left[R_s + \frac{X_m^2 r}{r^2 + X_r^2} \right]^2 + \left[X_s - \frac{X_m^2 X_r}{r^2 + X_r^2} \right]^2 = \frac{U_s^2}{I_{\text{пуск}}^2}. \quad (16)$$

Поскольку [1]

$$\Delta P_r = \omega_s M_{\text{мех}}, \quad (17)$$

получим еще два уравнения:

$$\begin{cases} \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н}}} = \frac{\Delta P_{r,\text{пуск}}}{\Delta P_{r,\text{н}}} = \frac{(R_{\text{эГ}} + r/s_{\text{н}})^2 + X_{\text{эГ}}^2}{(R_{\text{эГ}} + r)^2 + X_{\text{эГ}}^2} s_{\text{н}}; \\ \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = \frac{\Delta P_{r,\text{макс}}}{\Delta P_{r,\text{н}}} = \frac{(R_{\text{эГ}} + r/s_{\text{н}})^2 + X_{\text{эГ}}^2}{2(R_{\text{эГ}} + Z_{\text{эГ}})r} s_{\text{н}}. \end{cases} \quad (18)$$

Таким образом, для определения параметров схемы замещения АМ (также учитывая известные ограничения) получаем следующую систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} R_{\text{экв}} = R_s + \frac{X_m^2 r / s_{\text{н}}}{(r / s_{\text{н}})^2 + X_r^2}; \\ X_{\text{экв}} = X_s - \frac{X_m^2 X_r}{(r / s_{\text{н}})^2 + X_r^2}; \\ \left[R_s + \frac{X_m^2 r}{r^2 + X_r^2} \right]^2 + \left[X_s - \frac{X_m^2 X_r}{r^2 + X_r^2} \right]^2 = \frac{U_s^2}{I_{\text{пуск}}^2}; \\ \frac{(R_{\text{эГ}} + r/s_{\text{н}})^2 + X_{\text{эГ}}^2}{(R_{\text{эГ}} + r)^2 + X_{\text{эГ}}^2} s_{\text{н}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н}}}; \\ \frac{(R_{\text{эГ}} + r/s_{\text{н}})^2 + X_{\text{эГ}}^2}{2(R_{\text{эГ}} + Z_{\text{эГ}})r} s_{\text{н}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}; \\ R_s, r, X_s, X_r, X_m > 0; \\ \frac{X_m^2}{X_s X_r} \leq 1. \end{cases} \quad (19)$$

Обозначим искомые системы (19) в виде следующего вектора:

$$Z = [R_s, X_s, r, X_r, X_m]. \quad (20)$$

Если (20) является решением (19), то вектор

$$Z(k) = [R_s, X_s, kr, kX_r, \sqrt{k} X_m]. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (19), убедимся, что оно также является решением, где k – положительное рациональное число.

АМ, параметры которых связаны соотношениями (21), назовем подобными АМ.

Установим свойства инвариантности параметров подобных машин по отношению к выбору значения k .

1. Входные эквивалентные сопротивления инвариантны:

$$\begin{cases} R_{\text{эКВ}}(k) = R_{\text{эКВ}}; \\ X_{\text{эКВ}}(k) = X_{\text{эКВ}}. \end{cases}$$

2. Ток статора инвариантен

$$I_s(k) = \frac{U_s}{\sqrt{R_{\text{эКВ}}^2 + X_{\text{эКВ}}^2}} = I_s.$$

3. Ток ротора не инвариантен

$$i_r(k) = \frac{jX_m \sqrt{k}}{k \left(\frac{r}{s} + jX_r \right)} i_s = \frac{jX_m}{\frac{r}{s} + jX_r} \frac{1}{\sqrt{k}} i_s = \frac{1}{\sqrt{k}} i_r.$$

4. Потери активной мощности инвариантны

$$\Delta P(k) = I_s^2 R_s + I_r^2 \frac{1}{k} r k = \Delta P.$$

5. Коэффициент полезного действия инвариантен

$$\eta(k) = \frac{P - \Delta P}{P} = \eta.$$

6. Электромагнитный момент инвариантен

$$M(k) = I_r^2 \frac{1}{k} \frac{rk}{s \omega_s} = M.$$

Из последнего соотношения следует, что даже дополнительное измерение механического момента не снимает произвольности выбора параметра ротора (21), т. е. подобные АМ имеют одинаковые механические характеристики.

7. $R_{\text{эГ}}$ и $X_{\text{эГ}}$ не инвариантны:

$$\begin{cases} R_{\text{эГ}}(k) = \frac{R_s \left(\sqrt{k} X_m \right)^2}{R_s^2 + X_s^2} = k R_{\text{эГ}}; \\ X_{\text{эГ}}(k) = k X_r - \frac{X_s \left(\sqrt{k} X_m \right)^2}{R_s^2 + X_s^2} = k X_{\text{эГ}}. \end{cases}$$

Схема замещения подобных АМ приведена на рис. 6.

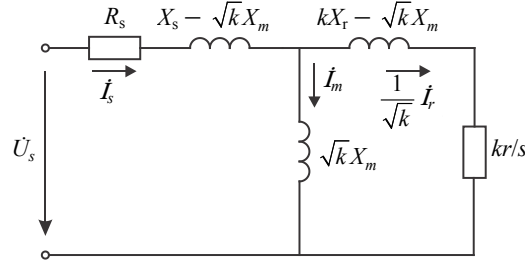


Рис. 6. Схема замещения подобных АМ в стационарном режиме

Fig. 6. The equivalent circuit of similar AM in stationary mode

Легко проверить, что режимы схемы, представленные на рис. 1 и 5, описываются одинаковыми уравнениями.

Определение параметров АМ экспериментальным путем

Предположим, что были выполнены два измерения при скольжениях s_1 и s_2 соответственно и определены $R_{\text{экв1}}$, $R_{\text{экв2}}$, $X_{\text{экв1}}$ и $X_{\text{экв2}}$. Исходя из (3) можем записать:

$$\begin{cases} R_{\text{экв1}} = R_s + \frac{X_m^2 a_1}{a_1^2 + X_r^2}; \\ X_{\text{экв1}} = X_s - \frac{X_m^2 X_r}{a_1^2 + X_r^2}; \\ R_{\text{экв2}} = R_s + \frac{X_m^2 a_2}{a_2^2 + X_r^2}; \\ X_{\text{экв2}} = X_s - \frac{X_m^2 X_r}{a_2^2 + X_r^2}, \end{cases} \quad (22)$$

где $a_1 = \frac{r}{s_1}$; $a_2 = \frac{r}{s_2}$.

Из (22) имеем:

$$R_{\text{экв1}} - R_{\text{экв2}} = \frac{(a_1 - a_2)(X_r^2 - a_1 a_2)}{(a_1^2 + X_r^2)(a_2^2 + X_r^2)} X_m^2. \quad (23)$$

$$X_{\text{экв1}} - X_{\text{экв2}} = \frac{a_1^2 - a_2^2}{(a_1^2 + X_r^2)(a_2^2 + X_r^2)} X_r X_m^2. \quad (24)$$

При $R_{\text{экв1}} = R_{\text{экв2}}$ из (23) получим:

$$(a_1 - a_2)(X_r^2 - a_1 a_2) = 0,$$

или

$$s_1 s_2 = \left(\frac{r}{X_r} \right)^2 = s_{кр.R}^2. \quad (25)$$

Следовательно, в двигательном режиме при двух различных скольжениях при выполнении условия (25) $R_{э\text{кв}1} = R_{э\text{кв}2}$. Это также видно из графика функции $R_{э\text{кв}}(s)$ (рис. 2).

Из (24) следует, что условие $X_{э\text{кв}1} = X_{э\text{кв}2}$ может выполняться только при $s_1 = s_2$, т. е. в двигательном режиме при двух различных скольжениях $X_{э\text{кв}1} \neq X_{э\text{кв}2}$. Это также видно из графика функций $X_{э\text{кв}}(s)$ (рис. 2).

Учитывая вышесказанное и разделив (23) на (24), получим:

$$a = \frac{R_{э\text{кв}1} - R_{э\text{кв}2}}{X_{э\text{кв}1} - X_{э\text{кв}2}} = \frac{X_r^2 - a_1 a_2}{(a_1 + a_2) X_r}, \quad (26)$$

или

$$X_r^2 - a(a_1 + a_2) X_r - a_1 a_2 = 0. \quad (27)$$

Рассматривая (27) как квадратное уравнение относительно X_r , определим условие существования его действительного решения

$$D = a^2 (a_1 + a_2)^2 + 4a_1 a_2 \geq 0. \quad (28)$$

При выполнении условия (28) решение (27) будет следующим:

$$X_{r1,2} = \frac{a(a_1 + a_2) \pm \sqrt{a^2 (a_1 + a_2)^2 + 4a_1 a_2}}{2}. \quad (29)$$

При $a_1 a_2 > 0$ квадратное уравнение (26) имеет хотя бы одно положительное действительное решение, которое определяет величину X_r . Зная значения X_r и r (r выбирается произвольно), из (24) определяем X_m , а из (22) вычисляем R_s и X_s .

ВЫВОДЫ

1. Аналитическое определение параметров схемы замещения асинхронной мощности сводится к решению системы нелинейных уравнений (19), которое требует произвольного задания одного из параметров ротора.

2. Экспериментальное определение параметров схемы замещения АМ требует проведения измерения напряжения, тока и активной мощности в статорной цепи при двух различных скольжениях и произвольного

задания одного из параметров ротора. Даже дополнительное измерение механического момента не снимает произвольности выбора параметра ротора.

3. Установлено, что в двигательном режиме существует критическое скольжение $s_{кр.Y}^- \neq 0$, при котором ток статора получается наименьшим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. М.: МЭИ, 2006. Т. 2. 531 с.
2. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.
4. Сафарян, В. С. Исследование режимов автономного асинхронного генератора с учетом характеристик первичного двигателя / В. С. Сафарян, С. Г. Геворгян // Вестник Государственного инженерного университета Армении. Сер. Энергетика. Электротехника. 2013. Вып. 16, № 1. С. 91–100.
5. Загорский, А. Е. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока / А. Е. Загорский, Ю. Г. Шакарян. М.: Энергоатомиздат, 1986. 176 с.
6. Асинхронные двигатели серии 4А: справ. / А. Э. Кравчик [и др.]. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
7. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. М.: Высш. шк., 2001. 312 с.
8. Гармаш, В. С. Определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей из динамических режимов / В. С. Гармаш // Научные труды Донецкого национального технического университета. 2009. № 9. С. 48–51.
9. Определение электромагнитных параметров асинхронных двигателей при питании напряжением низких частот / А. П. Калинов [и др.] // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. Сер. Диагностика в электромеханических и энергетических системах. 2006. Вып. 4, № 1. С. 117–121.
10. Бешта, А. С. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя при несимметричном питании статора / А. С. Бешта, А. А. Семин // Электромеханические и энергосберегающие системы. 2014. Вып. 2. С. 10–16.
11. Мощинский, Ю. А. Определения схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю. А. Мощинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество. 1998. № 4. С. 38–42.

Поступила 30.04.2015 Подписана в печать 22.06.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Ivanov-Smolenskiy A. V. (2006) *Electric Machines. Vol. 2*. Moscow: Publisher of the Moscow Power Engineering University. 531 p. (in Russian).
2. Kovach K. P., & Rats I. (1963) *Transient Phenomena in the Alternating Current Electric Machines*. Leningrad, Gosenergoizdat. 744 p. (in Russian).
3. Kopylov I. P. (2001) *Mathematic Modeling of the Electric Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola. 327 p. (in Russian).
4. Safaryan V. S., & Gevorgyan S. G. (2013) Analysis of the Autonomous Asynchronous Generator Regimes with Account of the Prime-Mover Characteristics. *Vestnik Gosudarstvennogo inzhenernogo universiteta Armenii. Ser. Energetika, Elektrotekhnik* [Bulletin of the State Engi-

- neering University of Armenia. Ser. Energy Industry, Electrotechnics], 16 (1), 91–100 (in Russian).
5. Zagorskiy A. Ye., & Shakaryan Yu. G. (1986) *Transient Processes Control in the Alternating-Current Electric Machines*. Moscow, Energoatomizdat. 176 p. (in Russian).
 6. Kravchik A. E., Shlaf M. M., Afonin V. I., & Sobolenskaia, E. A. (1982) *Asynchronous Motors of 4A Series*. Moscow, Energoizdat. 504 p. (in Russian).
 7. Goldberg O. D., Gurin Ya. S., & Sviridenko I. S. (2001) *Designing Electric Machines*. Moscow, Vysshaia shkola. 312 p. (in Russian).
 8. Garmash V. S. (2009) Ascertainment of the Asynchronous Motors Equivalent-Circuit Parameters from the Dynamic Regimes. *Nauchnye Trudy Donetskogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Scientific studies of the Donetsk National Technical University], 9, 48–51. (in Russian).
 9. Kalinov A. P., Reznik D. V., Rodskin D. I., & Romashikhin Iu. V. (2006) Ascertainment of the Asynchronous Motor Electromagnetic Parameters at Low Frequency Voltage Power Supply. *Vestnik Kremenchugskogo Gosudarstvennogo Politeknicheskogo Universiteta. Ser. Diagnostika v Elektromekhanicheskikh i Energeticheskikh Sistemakh* [Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University. Ser. Diagnostics in Electromechanical and Energy Systems], 4 (1), 117–121 (in Russian).
 10. Beshta A. S., & Semin A. A. (2014) Ascertainment of the Asynchronous Motors Equivalent-Circuit Parameters at Dissymmetric Power Supply of the Stator. *Elektromekhanicheskie i Energoberegaiushchie Sistemy* [Electromechanical and Energy Saving Systems], 2, 10–16 (in Russian).
 11. Moschinskiy Yu. A., Bepalov V. Ya., & Kiryakin A. A. (1998) Determining the Asynchronous Motor Equivalent Circuit from the Catalogue Data. *Elektrichestvo* [Electricity], 4, 38–42 (in Russian).

УДК 621.313.333.2

Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей

В. Е. Кривоносов¹⁾, С. В. Василенко¹⁾

¹⁾Приазовский государственный технический университет (Мариуполь, Республика Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Большое количество асинхронных двигателей работает в запыленной среде. На предприятиях горно-металлургического комплекса на лобовой части изоляции двигателей мощностью до 55 кВт наблюдается слой пыли до 3 см. Следствием этого могут быть локальный перегрев лобовых частей обмоток асинхронных двигателей и преждевременный выход их из строя. Вопрос влияния запыления обмотки на срок службы двигателя изучен очень мало. В современной литературе освещаются в основном экспериментальные исследования. Целью работы являлось получение зависимости дополнительного нагрева обмотки от толщины слоя пыли на ее лобовой части. Обмотка асинхронного двигателя рассматривалась как однородное тело. Тепловой режим асинхронного двигателя принимали как установившийся, ввиду того что время запыления изоляции обмоток значительно больше, чем постоянная времени нагрева двигателя. Полученное выражение позволяет по изменению температуры определить уровень запыления обмотки. Зависимость имеет линейный характер. Тип, размер и мощность двигателя не влияют на локальный перегрев изоляции, так как различие между температурами обмоток при их запыленности для асинхронных двигателей разной мощности не превышает 10 %. Разработано устройство, позволяющее контролировать уровень пыли на обмотке и сигнализировать о необходимости проведения профилактических мероприятий по ее очистке. Принцип работы устройства основан на сравнении результатов измерений двух датчиков температуры, установленных на лобовой части обмотки: один – в верхней части, другой – в нижней. По разнице показаний можно судить о слое пыли, осевшем на лобовой части обмотки. По результатам исследований получен патент на изобретение.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, запыленность, повышенная температура, слой пыли, обмотка, датчик температуры

Для цитирования: Кривоносов, В. Е. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей / В. Е. Кривоносов, С. В. Василенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 35–40

Адрес для переписки

Кривоносов Валерий Егорович
Приазовский государственный технический университет
просп. Metallurgov, 54,
87500, г. Мариуполь, Донецкая обл., Украина
Тел.: +380 97 821-73-25
yhtverf@mail.ru

Address for correspondence

Krivososov Valeriy E.
Priazov State Technical University
Metallurgov prosp., 54,
87500, Mariupol, Donetsk obl., Ukraine
Tel.: +380 97 821-73-25
yhtverf@mail.ru

Dusty Environment Impact on Lifespan of the Induction Motors Stator Winding

V. E. Krivososov¹⁾, S. V. Vasilenko¹⁾

¹⁾Priazov State Technical University (Mariupol, Republic of Ukraine)

Abstract. Large quantity of asynchronous motors work in heavily dusted environments. On the end-winding insulation of the motors to 55 kW operating in the mining and smelting enterprise

there is a 3 cm dust layer, which may lead to the asynchronous motor end-winding local overheat and consequent early breakdown. Contemporary literature allocates insufficient consideration to the issue of studying the impact the winding dust pollution has on the motor lifespan; for the most part they are experimental researches. The article investigates and establishes correlation relationship between the additional winding heating and the end-winding dust layer thickness. The investigation considers the induction motor winding to be a homogeneous solid and assumes the motor thermal conditions steady inasmuch as the winding insulation dust-cover forming time is much greater than the motor-heating time constant. The obtained expression permits determining the winding dust level by temperature variations; the dependence has linear character. Neither the motor type, size, nor the capacity do affect the local insulation overheating since the temperature difference between the windings being dust laden does not exceed 10 % for asynchronous motors of various capacity. The authors develop an appliance that enables the winding dustiness level monitoring and signals of necessity for the preventive cleaning measures implementation. The appliance operation principle is based on measuring results comparison of the two temperature-sensing devices mounted on the end-winding: one – in the upper part, and the other – in the bottom. The differential in the sensors reading-out allows estimating the dust layer sedimentation on the end-winding. A patent of invention has been issued on the investigation results.

Keywords: induction motor, dust, high temperature, dust layer, winding, temperature sensor

For citation: Krivonosov V. E., & Vasilenko S. V. Dusty Environment Impact on Lifespan of the Induction Motors Stator Winding. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 35–40 (in Russian)

Безаварийная работа асинхронных двигателей (АД) на промышленных предприятиях – важный фактор, влияющий на их производительность. В подавляющем большинстве случаев (85–90 %) отказы АД связаны с повреждением изоляции обмоток [1, 2].

АД, установленные на предприятиях горно-добывающей, металлургической, химической и других отраслей промышленности, часто работают в условиях агрессивной среды и повышенной запыленности. Вместе с охлаждающим воздухом мелкодисперсная пыль, характерная для коксохимических, металлургических и других видов производств, проникает внутрь АД. Запыленность вентиляционных каналов и лобовых частей обмоток статора ухудшает охлаждение двигателя, что приводит к дополнительному росту температуры изоляции обмоток АД.

Надежность работы АД в подавляющем большинстве случаев зависит от надежности изоляции его обмоток [3, 4]. Длительность работы изоляции на 90 % зависит от соблюдения теплового режима АД. Локальный перегрев изоляции участков обмотки АД, работающих в условиях запыленности, приводит к снижению срока эксплуатации изоляции всей обмотки. Своевременное выявление предельно допустимого запыления обмотки позволяет производить технический осмотр по факту возникновения его необходимости и не допускать ускоренного теплового старения изоляции. В современных экономических условиях многие предприятия вынуждены в целях экономии снижать объемы ремонтно-профилактических работ, поэтому своевременное удаление пыли с поверхности изоляции обмоток статора делает поставленную задачу актуальной.

От 40 до 60 % пробоев изоляции на корпус вызваны повреждением изоляции в лобовой части обмотки [5]. Из них, по данным электромеханических и электроремонтных цехов предприятий черной металлургии, от 60 до 80 % локальных пробоев изоляции связаны с ее перегревом в месте при замыкания лобовой части обмотки к сердечнику. Выход из строя обмотки

статора вызван совместным действием динамических усилий и локальным перегревом изоляции от загрязнения пылью. Мониторинг покрытия изоляции лобовых частей обмотки АД пылью в цехах комбинатов «Азовсталь» и имени Ильича показал в местах пробоя изоляции на корпус статора наличие мелкодисперсной пыли толщиной 3 см для АД мощностью до 55 кВт и более 5 см – для двигателей мощностью 100 кВт.

В современной литературе вопрос влияния запыленности обмоток практически не затронут. Изучение влияния толщины пыли на дополнительный нагрев обмоток носит в основном экспериментальный характер. Практические исследования [6] показали, что наличие на поверхности статорной обмотки слоя угольной пыли толщиной 0,9 мм приводит к повышению ее нагрева примерно на 10 °С.

Определение толщины слоя пыли на поверхности изоляции, при котором температура обмотки превысит допустимое значение для соответствующего класса изоляции не более чем на 5 °С, являлось предметом исследования авторов статьи. Время запыления изоляции обмоток АД – значительно большая величина, чем постоянная времени нагрева АД. Рассмотрим превышение температуры изоляции под слоем пыли в установившемся тепловом режиме АД.

Обмотку статора АД принимали как однородное тело, контактируемое с окружающей средой. На основании [7] уравнение теплового баланса имеет вид

$$\Delta P dt = k_{\text{то}} s_{\text{п}} \Delta \Theta dt + cm d\Theta, \quad (1)$$

где ΔP – потери мощности в АД; $k_{\text{то}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности АД; $s_{\text{п}}$ – площадь поверхности охлаждения; $\Delta \Theta$ – разность температур между обмоткой АД и окружающим воздухом; m – масса обмотки; c – теплоемкость меди.

Для установившегося режима уравнение (1) принимает вид

$$\Delta P = k_{\text{то}} s_{\text{п}} (\Theta_{\text{об}} - \Theta_{\text{о.с}}), \quad (2)$$

где $\Theta_{\text{об}}$ – температура обмотки; $\Theta_{\text{о.с}}$ – температура окружающей среды.

Ослабление теплового потока q от изоляции обмотки статора до охлаждающего воздуха через плоско-параллельные стенки пыли определяли на основании [8, 9] из выражения

$$q = -\alpha \frac{d\Theta}{dx}, \quad (3)$$

где q – удельный тепловой поток; α – коэффициент теплопроводности пыли, осевшей на обмотке; Θ – температура изменения потока вдоль оси x .

На основании уравнения теплового баланса, приведенного в (2), и формулы (3) получено выражение для определения толщины слоя пыли из условия допустимого нагрева АД

$$h = \frac{\alpha(\Theta_{yc2} - \Theta_{yc1})}{\frac{\Delta P}{S_n} - \Theta_{yc1} k_{to}}, \quad (4)$$

где Θ_{yc1} – температура изоляции, непокрытой пылью; Θ_{yc2} – то же под слоем пыли толщиной h .

Полученное выражение позволит определить толщину слоя пыли, при которой температура обмоток АД повысится на величину, равную $(\Theta_{yc2} - \Theta_{yc1})$, и может быть применено в системах диагностики и прогнозирования работы АД.

Разработаны способ и устройство тепловой защиты обмоток АД, которые работают в запыленной среде [10]. Схема устройства представлена на рис. 1.

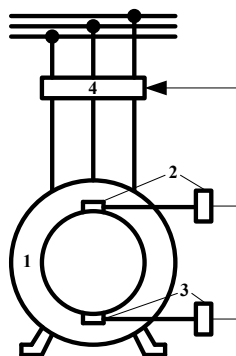


Рис. 1. Лабораторная модель устройства по определению уровня запыления обмоток статора: 1 – обмотка статора АД; 2 – датчик температуры DS18B20 и его преобразователь, который измеряет температуру верхней лобовой части обмотки статора; 3 – датчик температуры DS18B20 и его преобразователь, измеряющий температуру нижней лобовой части обмотки статора; 4 – блок коммутации и сигнализации

Fig. 1. Laboratory model of the device for detecting the dust level of stator winding:

1 – stator winding of AM (asynchronous motor);
2 – temperature sender DS18B20 and its converter measuring the temperature in the upper end-part of the stator winding;
3 – temperature sender DS18B20 and its converter measuring the temperature in the bottom end-part of the stator winding;
4 – switching and alarm block

На лобовую часть обмотки статора устанавливают два датчика температуры DS18B20, которые одновременно измеряют температуру верхней и диаметрально противоположной – нижней – частей обмотки. Каждый датчик имеет свой преобразователь, обрабатывающий сигналы и отправляющий их на блок коммутации и сигнализации. В этом блоке происходит сравнение полученных данных, и по их разнице делается вывод об уровне запыления обмотки. Устройство защищает АД от тепловой перегрузки, определяет ее причину, отделяя запыление от токовых перегрузок и витковых замыканий, своевременно оповещает о необходимости проведения профилактических работ по очищению обмоток от пыли, что повышает надежность и увеличивает срок эксплуатации и безаварийной работы АД.

Результаты моделирования для двигателей мощностью до 55 кВт при различных значениях теплопроводности материалов приведены на рис. 2.

Анализ графиков на рис. 2 позволил сделать следующие выводы:

- чем меньше коэффициент теплопроводности материала, осевшего на поверхности обмоток, тем выше температура обмоток под этим слоем. Например, при слое пыли, равном 1,5 см (рис. 2с), температура обмоток при $\lambda = 0,75$ Вт/(м·°С) составляет 127 °С, а при $\lambda = 0,2$ Вт/(м·°С) она равна 146 °С;

- локальное превышение температуры изоляции обмотки на 8–10 °С при толщине запыления обмоток 1,0–1,5 см снижает срок эксплуатации АД в два раза, зависит непосредственно от толщины слоя пыли и ее теплопроводности;
- тип, размер и мощности АД не влияют на локальный перегрев изоляции, так как различие между температурами обмоток при их запыленности для АД различной мощности не превышает 10 %.

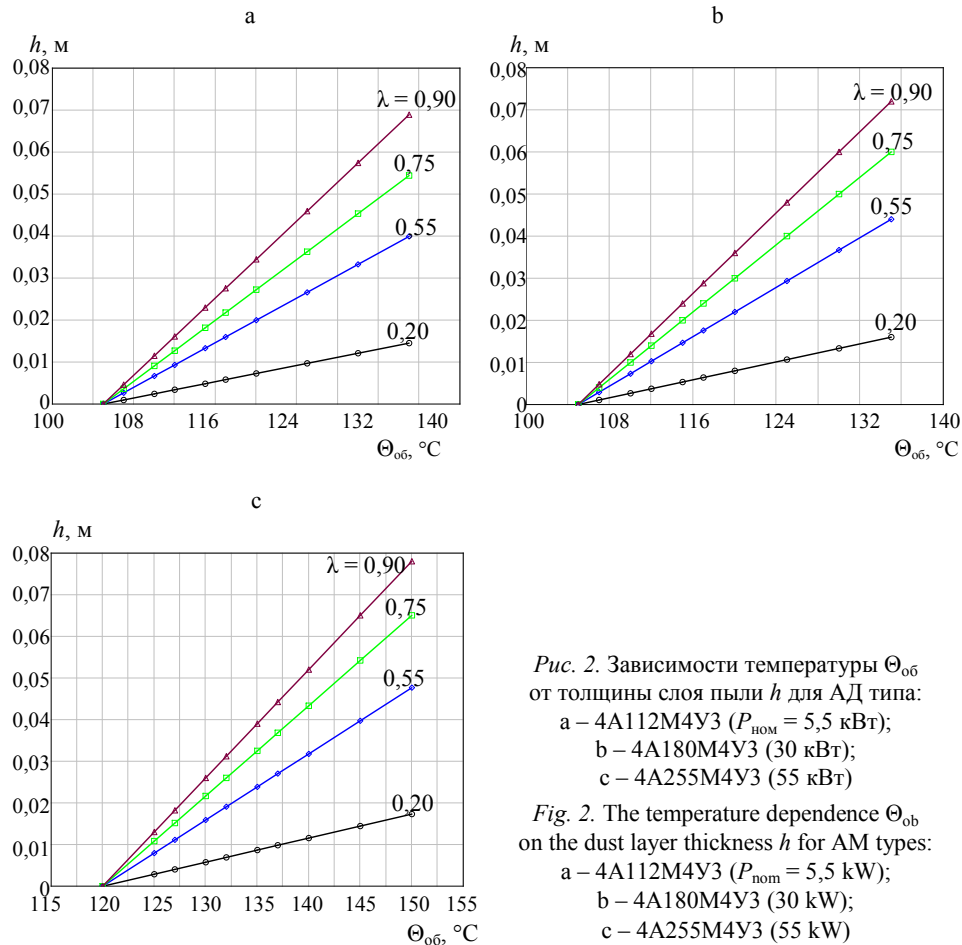


Рис. 2. Зависимости температуры $\Theta_{об}$ от толщины слоя пыли h для АД типа:
а – 4А112М4У3 ($P_{ном} = 5,5$ кВт);
б – 4А180М4У3 (30 кВт);
с – 4А255М4У3 (55 кВт)

Fig. 2. The temperature dependence $\Theta_{об}$ on the dust layer thickness h for AM types:
а – 4А112М4У3 ($P_{ном} = 5,5$ kW);
б – 4А180М4У3 (30 kW);
с – 4А255М4У3 (55 kW)

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что длительная работа асинхронных двигателей в условиях запыленности на многих промышленных производствах приводит к образованию на поверхности лобовых частей обмотки слоя пыли толщиной 3 см и более. Температура изоляции обмотки статора превышает допустимую на 9–19 °С.
2. Полученная математическая зависимость между дополнительным нагревом изоляции при локальном запылении позволила разработать способ и устройство своевременного выявления предельно допустимого температурного перегрева изоляции.

3. Для АД в диапазоне мощностей от 5,5 до 50,0 кВт с 10%-й погрешностью превышение температуры обмотки статора при слое пыли 1 см с теплопроводностью $\lambda = 0,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ составит 3 °C , с $\lambda = 0,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ оно равно 5 °C , с $\lambda = 0,55 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ превышение 8 °C , а с $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ оно будет 19 °C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолин, Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. Л.: Энергия, 1976. 248 с.
2. Слоним, Н. М. Испытания асинхронных двигателей / Н. М. Слоним. М.: Энергия, 1980. 88 с.
3. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. М.: Высш. шк., 1985. 232 с.
4. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. СПб.: СЗТУ, 2004. 56 с.
5. Яманов, С. А. Старение, стойкость и надежность электрической изоляции / С. А. Яманов, Л. В. Яманова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 176 с.
6. Надежность асинхронных электродвигателей / В. Б. Ванеев, [и др.]. М.: Наука, 1964. 524 с.
7. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. М.: Энергия, 1984. 240 с.
8. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. М.: Энергия, 1977. 344 с.
9. Филиппов, И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. Л.: Энергия, 1974. 383 с.
10. Спосіб контролю і теплового захисту обмоток електричних машин, які працюють у запыленому середовищі: пат. 107898 Україна: H02P 5/04, H02K 15/12, H02H 5/10, G01K 13/08 / В. Є. Кривоносов, І. В. Жежеленко, О. В. Московець, С. В. Василенко; заявл. 26.02.2014; опубл. 25.02.2015.

Поступила 30.04.2015 Подписана в печать 19.06.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Ermolin N. P., & Zherikhin I. P. (1976) *Reliability of Electrical Machines*. Leningrad, Energia. 248 p. (in Russian).
2. Slonim N. M. (1980) *Testing Asynchronous Motors*. Moscow, Energia. 88 p. (in Russian).
3. Kotelenets N. F., & Kuznetsov N. L. (1985) *Testing and Reliability of Electrical Machines*. Moscow, Vysshaya shkola. 232 p. (in Russian).
4. Vorobyov V. E., & Kucher V. Ya. (2004) *Forecasting the Life Time of Electric Machines*. St. Petersburg, SZTU. 56 p. (in Russian).
5. Yamanov S. A., & Yamanova L. V. (1990) *Aging, Durability and Reliability of the Electrical Insulation*. Moscow, Energoatomizdat. 176 p. (in Russian).
6. Vaneev V. B., Glavny V. D., Gostishchev V. A., & Serdyuk, L. I. (1964) *Reliability of Induction Motors*. Moscow, Nauka. 524 p. (in Russian).
7. Syromyatnikov I. A. (1984) *Modes of Operation of Asynchronous and Synchronous Motors*. Moscow, Energia. 240 p. (in Russian).
8. Mikheev M. A., & Mikheeva I. M. (1977) *Fundamentals of Heat Transfer*. Moscow, Energia. 344 p. (in Russian).
9. Filippov I. F. (1974) *Fundamentals of heat Transfer in Electrical Machines*. Leningrad, Energia. 383 p. (in Russian).
10. Krivonosov V. E., Zhezhelenko I. V., Moskovets O. V., & Vasilenko S. V. (2015) *Method of Control and Thermal Protection of Windings of Electrical Machines Working in a Dusty Environment*. Patent Ukraine Number 107898 (in Ukrainian).

Received: 30 April 2015

Accepted: 19 June 2015

Published online: 16 December 2015

УДК 536.24

Развитие энергоиспользования линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности

В. Н. Романюк¹⁾, Д. Б. Муслина¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Определены и показаны изменения энергопотребления в результате утилизации низкотемпературных побочных потоков растворов широко используемых линий непрерывного крашения на отделочных производствах предприятий легкой промышленности Беларуси. Утилизация осуществляется за счет привлечения абсорбционных бромистолитиевых тепловых насосов с различными энергетическими характеристиками, которыми являются отопительный коэффициент (коэффициент преобразования $COP_{hp} = 1,15; 1,7; 2,2$) и тепловая мощность. Последняя связана с вариантом энергоиспользования преобразованного теплового потока со схемой системы нагрева теплоносителя (одно-, двух- и многоступенчатый нагрев). Рассмотрен переход на неприменяемый ранее предварительный подогрев технической воды, связанный с технологически допустимой возможностью ее подачи в красильный аппарат с более высокой температурой и расширением перечня используемых теплоносителей. Даны варианты внутреннего и внешнего энергоиспользования и их оценка на базе относительных энергетических и эксергетических характеристик. Результаты термодинамического анализа эффективности работы модернизированного производства показали, что наряду с традиционным и очевидным внутренним энергоиспользованием, связанным с рекуперацией теплоты потоков, целесообразно расширение ряда применяемых теплоносителей, возможен переход к предварительному двух- и многоступенчатому нагреву технической воды. Доказано, что крайне низкие показатели существующего энергообеспечения, величина которых обусловлена в том числе конструкцией агрегатов, традиционным подходом к энергообеспечению и использованию теплоносителей, наконец, всей теплоэнергетической системой предприятия (отвечающей требованиям ушедшего периода дешевых энергоресурсов), улучшаются на один-два порядка. Рассмотрены варианты модернизации линии крашения, предполагающие значительные инвестиции. Предварительная экономическая оценка вариантов такой неизбежной модернизации теплоэнергетической системы предприятия показала реальность выполнения всех современных требований к подобным проектам: экономических, экологических, энергетических.

Ключевые слова: эксергия текстильных материалов, эксергетический вход, эксергетический выход, утилизация, побочные тепловые потоки, тепловые насосы

Для цитирования: Романюк, В. Н. Развитие энергоиспользования линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 41–54

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Energy Recovery for Continuous Dyeing Process in Textile Industry Enterprises

V. N. Romaniuk¹⁾, D. B. Muslina¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper ascertains and presents alteration in the energy consumption as a consequence of utilizing the low-temperature waste streams commonly used in the lines of continuous dyeing at the finishing shops of textile enterprises of Belarus. The utilization realizes through the engagement of lithium-bromide absorption heat pumps with various energy characteristics such as the heating coefficient (relative conversion ratio $COP_{hp} = 1,15; 1,7; 2,2$) and the heating capacity. The latter associates with the converted heat-flow energy utilization variant with the heat-transfer medium heating system scheme (one-, two- and multistage heating). The article considers transition to previously not applied service-water preheating due to the technological acceptance of feeding higher temperature water into the dyeing machine and widening specification of the heat-transfer media. The authors adduce variants of internal and external energy use and their evaluation based on the relative energy and exergy characteristics. With results of the thermodynamic analysis of the modernized production effectiveness the researchers prove that alongside with traditional and apparent interior utilization of the energy associated with the stream heat recuperation, it is advisable to widen the range of applied heat-transfer media. The transition to the service water two- and multi-stage preheating is feasible. The study shows that the existing energy supply efficiency extremely low index-numbers improve by one or two degrees. Since they are conditioned, inter alia, by the machinery design, traditional approach to energy supply and heat-medium usage as well as the enterprise whole heating system answering requirements of the bygone era of cheap energy resources. The authors examine the continuous dyeing line modernization options intending considerable investments. Preliminary economic assessment of such inevitable modernization options for the enterprise entire heat-and-power system shows reality of meeting all going with the times requirements such as economic, environmental, energy for similar projects.

Keywords: exergy of textile materials, exergy input, exergy output, utilization, waste heat streams, heat pumps

For citation: Romaniuk V. N., & Muslina D. B. Energy Recovery for Continuous Dyeing Process in Textile Industry Enterprises. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 41–54 (in Russian)

Введение

Всесторонний анализ энергообеспечения характерных для белорусских предприятий легкой промышленности линий непрерывного крашения отделочных производств проведен в [1–3]. Рассмотрены пути улучшения ситуации за счет реализации простой рекуперации тепловых потоков с использованием различных теплообменных аппаратов. Дальнейшее углубление утилизации побочных тепловых потоков связано с переходом к использованию низкотемпературных ($t < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) потоков, в большом количестве сопровождающих теплотехнологию крашения отделочных производств. Для утилизации обозначенных потоков возможно применение парокомпрессионных тепловых насосов (ПКТН) или абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН). В связи с этим необходимо определить и выбрать типоразмеры теплонасосных установок (ТНУ) и вариантов их применения в отделочном производстве.

Состояние проблемы

Из данных [1–3] следует, что уровень и текущее состояние энергоиспользования линий крашения отделочных производств предприятий легкой промышленности неудовлетворительны, не отвечают изменившейся ситуации на рынке энергоносителей, когда тарифы на электро- и тепловую энергию выросли на два порядка. Это, как известно, определило тяжелое финансовое положение рассматриваемых предприятий. Необходимы экстренные меры по снижению себестоимости их продукции. В условиях, когда сырье закупается на внешних рынках, остаются два пути уменьшения себестоимости: снижение уровня благосостояния работников или сокращение затрат на энергообеспечение предприятий. Естественно, приоритет за последним направлением. Среди достаточно многочисленных решений задачи снижения энергозатрат и улучшения финансового положения предприятий отрасли представляют интерес развитие и углубление утилизации побочных тепловых потоков основного производства, что имеет приоритет даже перед таким результативным путем энергосбережения, как энерготехнологическая полигенерация [4]. Это можно объяснить при системном подходе к рассмотрению проблемы с проекцией результатов на энергобаланс страны. С вводом в строй АЭС в энергосистеме Беларуси появляется чрезвычайно важная и сложная задача регулирования мощности из-за несовпадения структуры энергопотребления хозяйственного комплекса и структуры генерации потоков тепловой и электрической энергии генерирующих мощностей энергосистемы, их типоразмеров и технических возможностей. В этом контексте важны любые шаги предприятий хозяйственного комплекса по требуемому изменению структуры потребления энергопотоков и углублению утилизации тепловой энергии. В рамках решения обозначенной задачи находится предлагаемая утилизация побочных потоков, что имеет экологический эффект снижения выбросов в окружающую среду вредных ингредиентов. Для предприятий более важно то обстоятельство, что данное направление энергосбережения одновременно решает задачу улучшения их финансового положения.

Сравнение вариантов использования ПКТН и АБТН

Утилизационные тепловые насосы переживают пик развития, что обусловлено их востребованностью в настоящее время. Известно, что АБТН, несмотря на свою достаточно низкую энергетическую эффективность ($COP_{hp} = 1,2–2,2$ для АБТН против $COP_{hp} = 1,8–5,5$ для ПКТН), оказываются более удобными в эксплуатации, надежными и, наконец, экономически более эффективными. Это связано с различием в энергоресурсах, требуемых для работы ПКТН и АБТН, и соотношением тарифов в стране на используемые энергоносители для ТНУ (рис. 1).

Кроме отмеченных различий, важно другое существенное обстоятельство при использовании ТНУ в энергообеспечении теплотехнологий, заключающееся в уровне максимальных температур, до которого может быть нагрет поток, направленный к потребителю. В АБТН максимальная темпе-

ратура находится на уровне 85 °С, а в ПКТН эта температура зависит и от свойств применяемых хладагентов. В основном в качестве последних используются различные фреоны, для которых предельная температура нагрева сетевой воды составляет 55–60–70 °С [5–13]. Однако при использовании диоксида углерода (R744) в качестве рабочего тела возможно достижение температур до 130 °С, но стоимость этих ПКТН в разы превышает фреоновые агрегаты [6–9].

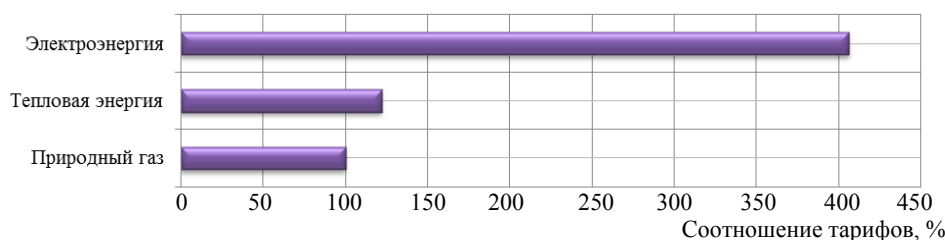


Рис. 1. Соотношение тарифов на основные энергоресурсы для промпредприятий Беларуси

Fig. 1. Correlation of the major energy resources tariffs for the industrial enterprises in Belarus

При использовании ТНУ в составе теплоэнергетической системы существующих отделочных производств со сложившимися компоновочными решениями необходимо учитывать ограниченность доступа к побочным потокам. В местах, где возможен отбор потока, его температура находится в пределах 50 °С. Для реализации максимального потенциала в ТНУ необходимо охлаждать поток до 20 °С. Это обстоятельство ограничивает как температуру нагреваемого потока, так и значение отопительного коэффициента (рис. 2).

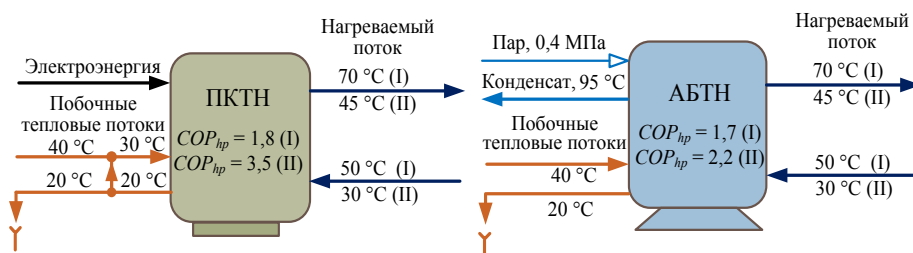


Рис. 2. Основные сравнительные характеристики ПКТН и АБТН

Fig. 2. The main comparative characteristics of vapor compression heat pumps (VCHP) and absorption heat pumps (ABHP)

Для выбора типа ТНУ в качестве целевой функции принят расход условного топлива в поле экономических ограничений: сроки возврата инвестиций, IRR, NPV и др. Как аргументы используются типоразмер ТНУ, COP_{ph} , требуемый температурный график сетевой воды. Результаты приведены на рис 3, 4. Температура утилизируемых стоков в случае АБТН может снижаться на 10–20 °С до конечной температуры 15–20 °С, в случае ПКТН эта величина составляет 5–10 °С. Иные перепады температур могут

быть обеспечены с помощью перепускных потоков (рис. 2). Такая же ситуация имеет место и в отношении сетевой воды.

В существующих условиях удельный расход условного топлива (УРТ) на теплоту процесса нагрева сетевой воды и на генерацию пара давлением 0,5 МПа принимали 0,0382 т/ГДж (0,160 т/Гкал), УРТ на генерацию электроэнергии от КЭС – 0,336 т/(МВт·ч), тариф на покупку природного газа для промышленных предприятий – 3811667 руб./тыс. м³ на 07.2015. Из полученных сравнений вытекает целесообразность применения АБТН.

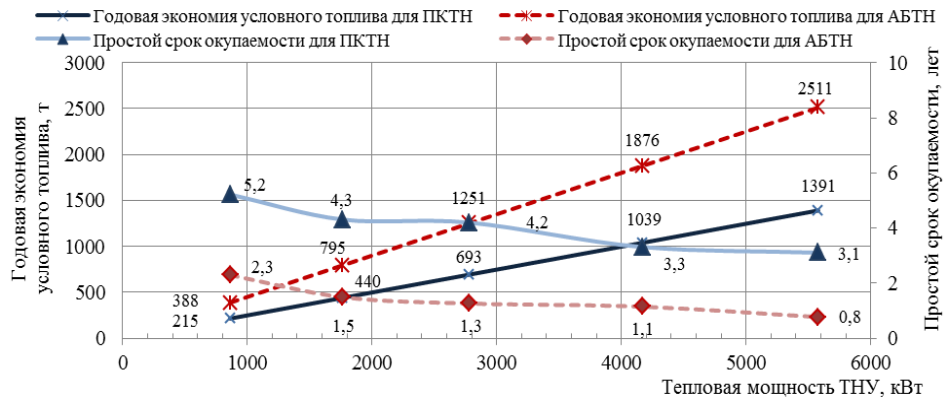


Рис. 3. Сроки возврата инвестиций для наиболее характерных брендов ПКТН с $COP_{hp} = 3,5$ и АБТН с $COP_{hp} = 2,2$ и 6,0 тыс. ч работы с номинальной мощностью при температурах нагреваемого потока 45/30 °C

Fig. 3. The investment return periods for most typical brands of VCHP with $COP_{hp} = 3,5$ and ABHP with $COP_{hp} = 2,2$, with annual 6,0 thousand operation hours at nominal capacity and generated heat flows temperature 45/30 °C

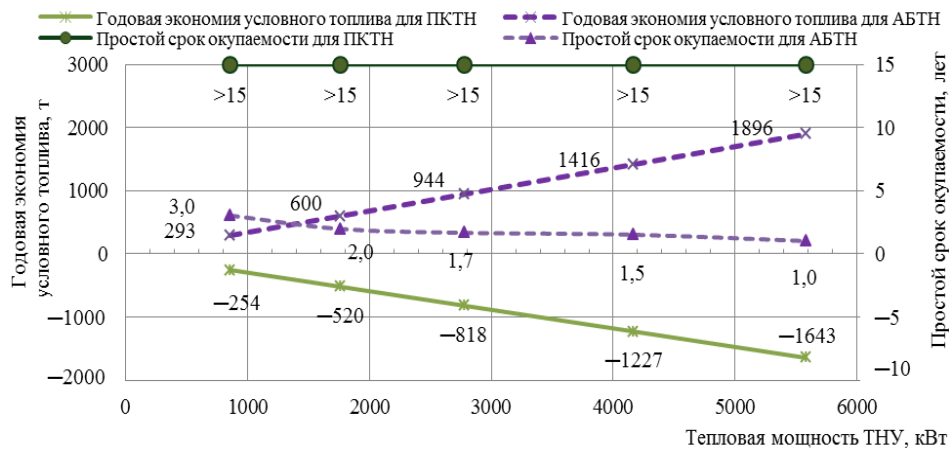


Рис. 4. Сроки возврата инвестиций для наиболее характерных брендов ПКТН с $COP_{hp} = 1,8$ и АБТН с $COP_{hp} = 1,7$ и 6,0 тыс. ч работы с номинальной мощностью при температурах нагреваемого потока 70/50 °C

Fig. 4. The investment return periods for most typical brands of VCHP with $COP_{hp} = 1,8$ and ABHP with $COP_{hp} = 1,7$, with annual 6,0 thousand operation hours at nominal capacity and generated heat flows temperature 70/50 °C

Использование АБТН в составе теплоэнергетической системы предприятий легкой промышленности и сопряженного промузла

Среди многообразия подходов к утилизации низкотемпературных потоков линии непрерывного крашения выбрали предварительный нагрев технической воды перед подачей непосредственно в красильный аппарат по двум схемам. Первая ориентирована на использование теплового потока АБТН внутри теплотехнологии крашения, вторая – на внутреннюю и внешнюю утилизацию теплового потока АБТН. В обеих схемах рассматриваются два варианта: одно- и двухступенчатого предварительного нагрева поступающего технологического потока.

Использование утилизируемого потока в пределах технологического потребления линий непрерывного крашения

Принципиальная схема составов теплотехнологических систем для расчета эксергетических показателей процесса энергообеспечения при внутренней утилизации (рекуперации) приведена на рис. 5.

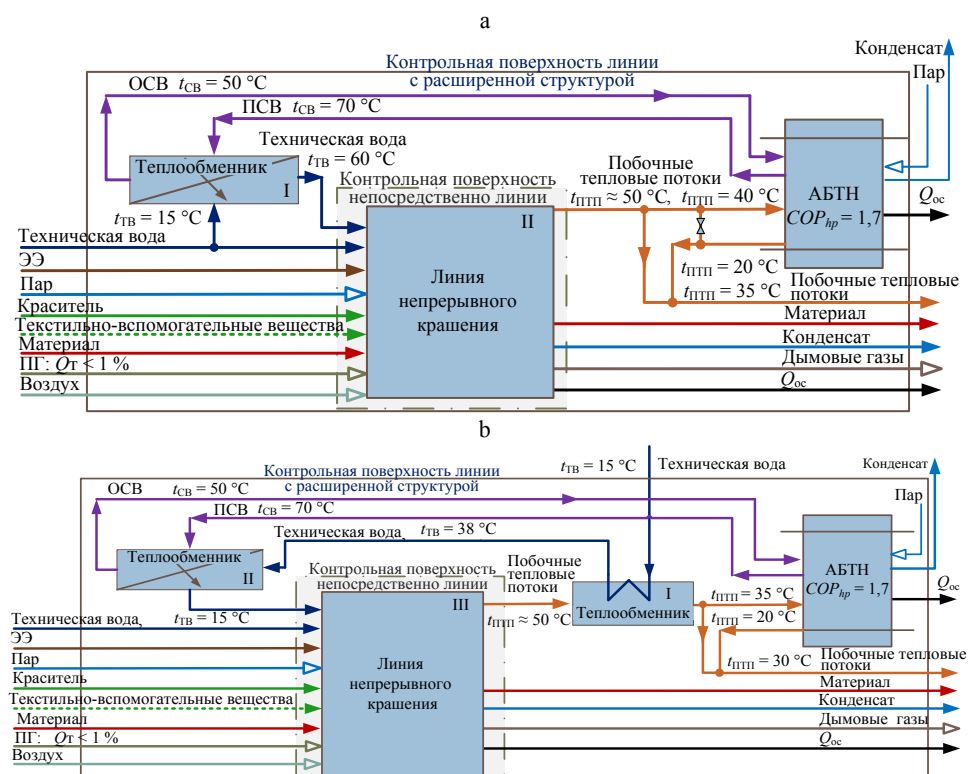


Рис. 5. Схемы составов теплотехнологических систем для расчета эксергетических показателей процесса энергообеспечения при внутренней утилизации (рекуперации): а – одноступенчатая рекуперация после модернизации с установкой АБТН; б – двухступенчатая рекуперация после модернизации с установкой АБТН и теплообменного оборудования

Fig. 5. Process flow diagrams of heat technology systems for evaluating exergetic efficiency of the energy supply process with inner utilizing (recuperation): а – single-stage recovery after modernization with ABHP installation; б – two-stage recovery after modernization with ABHP and heat-exchange equipment installation

Для одноступенчатой рекуперации проведены расчеты влияния параметров потоков на экономию тепловой энергии, глубину утилизации тепловой энергии побочных потоков (температура стоков, поступающих в канализацию), требуемые инвестиции и простой срок их возврата в зависимости от значения энергетического КПД АБТН, который изменялся в пределах $COP_{hp} = 1,2-2,2$. Температура нагрева технической воды перед поступлением в аппарат принята максимально допустимой по техническим условиям. Пределы изменений устанавливались в связи с характеристиками АБТН двух изготовителей: китайской BROAD и индийской Thermax корпораций (рис. 6).

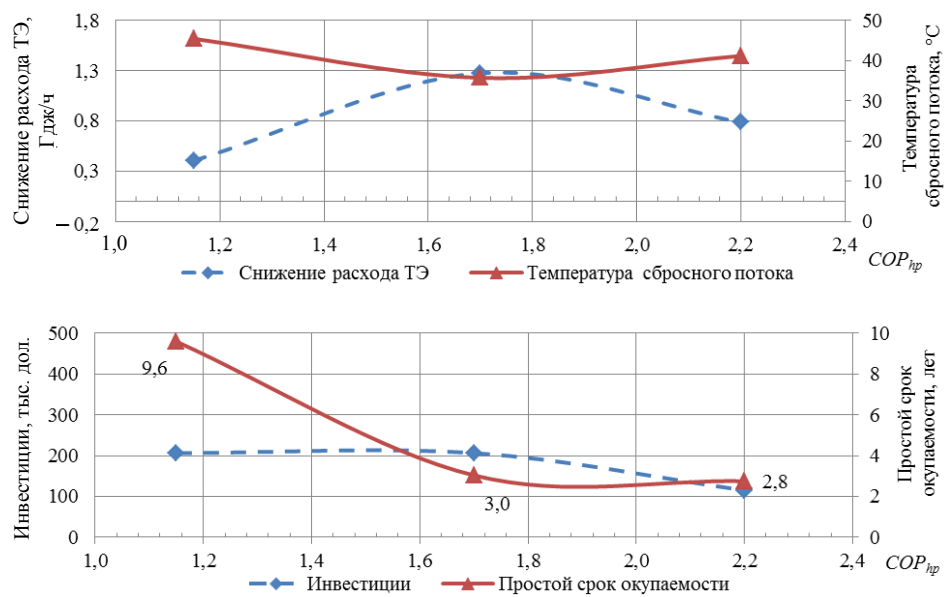


Рис. 6. Изменение показателей одноступенчатого варианта рекуперации в зависимости от энергетического КПД АБТН

Fig. 6. The single-stage recovery variant parameters alteration in terms of the ABTP energy efficiency

В случае одноступенчатого нагрева входного потока технической воды максимальная экономия тепловой энергии при практически равных инвестициях и сроке их возврата на уровне трех лет достигается с использованием АБТН с $COP_{hp} \approx 1,7$. Принятые условия во всех случаях не обеспечивают высокую глубину утилизации побочных потоков (температура стоков понижается до 38 °C), что связано с отсутствием потребления внутри теплотехнологии потока всей теплоты от АБТН. Величина последнего может быть уменьшена при переходе к двухступенчатой схеме предварительного нагрева входного потока. Для двухступенчатой схемы рекуперации результаты приведены на рис. 7.

При отопительном коэффициенте 2,2 температура нагреваемого в АБТН потока, исходя из характеристик насоса, не может превышать 35 °C,

что ниже температуры потока после 1-й ступени нагрева технической воды, равной 38 °С. Поэтому диапазон изменения отопительного коэффициента здесь сужен, и с АБТН, имеющим $COP_{hp} \approx 2,2$, схема не реализуется из-за отсутствия нагрузки для 2-й ступени. В данной схеме надо ориентироваться на АБТН с $COP_{hp} \approx 1,7$ при охлаждении стоков до температуры 30 °С.

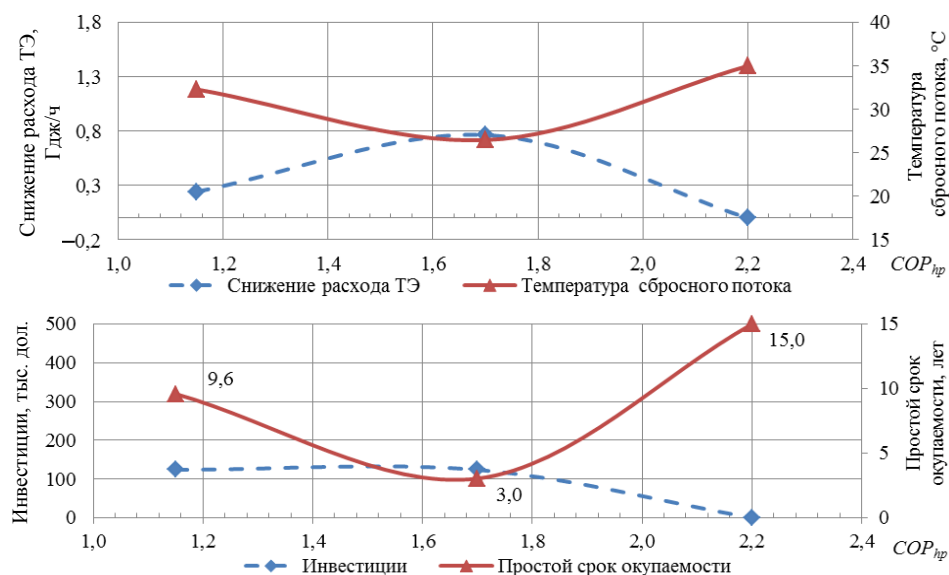


Рис. 7. Изменение показателей в зависимости от энергетического КПД АБТН для двухступенчатого варианта рекуперации

Fig. 7. Parameters alteration according to the ABHP energy efficiency for the two-stage recovery variant

Показатели термодинамического анализа обеих схем рекуперации приведены в табл. 1. Использованные характеристики для оценки эффективности варианта рассматривались ранее при анализе модернизации тепловой схемы линии непрерывного крашения без привлечения АБТН [14].

Таблица 1

Основные показатели по вариантам модернизации при многоступенчатом подогреве за счет ввода АБТН

Major parameters by the variants of modernization with multistage heating owing to the ABHP introduction

Наименование показателя	Обо- зна- чение	Положение				
		Сущест- вующее	Рекуперация на базе АБТН			
			одноступенчатая		двухступенчатая	
			только линии*	линии с расширен- ной струк- турой*	только линии*	линии с расширен- ной струк- турой*
1	2	3	4	5	6	7
Эксергетический вход, МДж/ч	$\sum E$	21776	21027	21419	21027	21197
Транзитная эксергия, МДж/ч	$\sum E^{tr}$	18517	18527	18471	18527	18443
Располагаемая эксергия, МДж/ч	$E_{расп}$	3259	2500	2948	2500	2754

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Полезная эксергия, МДж/ч	$E_{исп}$	4	4	4	4	4
Эксергетический выход, МДж/ч	$\sum E^*$	18520	18531	18475	18531	18447
Внешние потери эксергии ТС, МДж/ч	$\sum D_e$	706	581	581	581	581
Внутренние потери эксергии в ТС, МДж/ч	$\sum D_i$	2549	1915	2363	1915	2169
Энергетический КПД, %	η_3	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0
Степень термодинамического совершенства технической системы, %	ν	85,0	88,1	86,3	88,1	87,0
Термодинамический КПД, %	η_e	0,112	0,145	0,124	0,145	0,132
Степень технологического совершенства, %	β	15,0	11,9	13,8	11,9	13,0
Степень полного совершенства технической системы, %	μ	0,0167	0,0172	0,0170	0,0172	0,0172
Эксергетический КПД = $\nabla E_{пол}/\nabla E_{зат}$, %	η_e^{**}	0,20	0,27	0,22	0,27	0,24
Удельные затраты энергии на тонну материала с учетом электроэнергии, ГДж/т	q	10,2	7,0	8,9	7,0	8,1
Удельные затраты эксергии на тонну материала, ГДж/т	e	2,9	2,1	2,6	2,1	2,4
Годовая экономия условного топлива, т	ΔB	—	290		476	
Простой срок возврата инвестиций, лет	τ	—	3,0		1,5	
* Пояснения линии расширенной структуры обеих схем (рис. 5).						
** Эксергетический КПД, определяемый по принятым полезным эффектам и затратам эксергии [15].						

Из анализа результатов следует, что рекуперация повышает термодинамическую эффективность энергообеспечения линии и снижает потребление энергоресурсов в поле всех экономических ограничений. В двухступенчатом варианте рекуперации тепловой энергии результирующие показатели оказываются выше: прежде всего, годовая экономия условного топлива превышает одноступенчатый вариант на 186 т у. т., или на 65 %. В масштабах отрасли для крупных отделочных производств это равносильно годовой экономии ТЭР порядка 5–7 тыс. т у. т., или 4–6 млн м³ природного газа в год.

Смешанное использование энергии утилизируемого потока

Принципиальная схема использования теплоты побочных потоков — как внутри теплотехнологии, так и внешними потребителями — приведена на рис. 8. Схема реализуема при наличии внешних по отношению к линии крашения потребителей тепловой энергии. В этом случае целесообразно совместить рекуперацию теплоты с отпуском избытков тепловой энергии на сторону, что углубляет утилизацию энергии низкотемпературных побочных потоков, обеспечивая их охлаждение до 20 °С. Внешние потребители тепловой энергии могут быть как внутри предприятия (другие производства, кондиционирование, отопление), так и сопряженного промузла, либо системы коммунального теплоснабжения. На рис. 8 показаны те же

варианты нагрева потоков, что и в случае внутреннего теплоиспользования потоков: одно- и двухступенчатая утилизация.

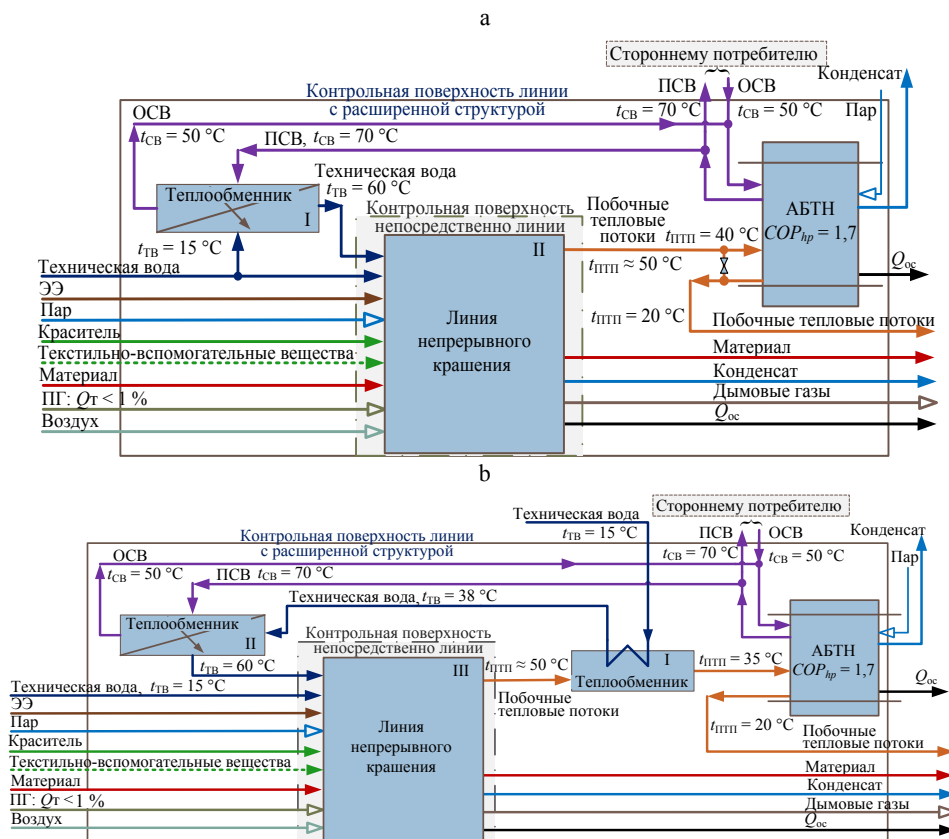


Рис. 8. Схемы составов теплотехнологических систем при отпуске избытков тепловой энергии стороннему потребителю для расчета эксергетических показателей процесса энергообеспечения: а – положение после модернизации с установкой АБТН; б – положение после модернизации с установкой АБТН и теплообменного оборудования

Fig. 8. Process flow diagrams with excess heat energy output to off-site customers for evaluating energy-supply process exergetic efficiency:

а – position after modernization with installation of the ABHP;
б – position after modernization with installation of the ABHP and heat exchange equipment

Результаты расчетов приведены на рис. 9, 10 и в табл. 2.

В случае реализации приведенной модернизации термодинамическая эффективность энергоиспользования имеет потенциал роста на два порядка: с 0,11 до 15,00 %, т. е. в 135 раз. Таким образом, удалось доказать весьма высокую эффективность предложенной модернизации. Резкое улучшение результатов в сравнении с внутренним потреблением теплоты утилизируемых потоков связано с увеличением объемов утилизации. Этот очевидный факт находится в полном соответствии с положением концепции интенсивного энергосбережения о необходимости расширения энергосберегающей базы для достижения максимального результата [16]. Из двух рассмотренных схем утилизации при наличии внешнего потребления целесообразен одноступенчатый вариант нагрева потоков.

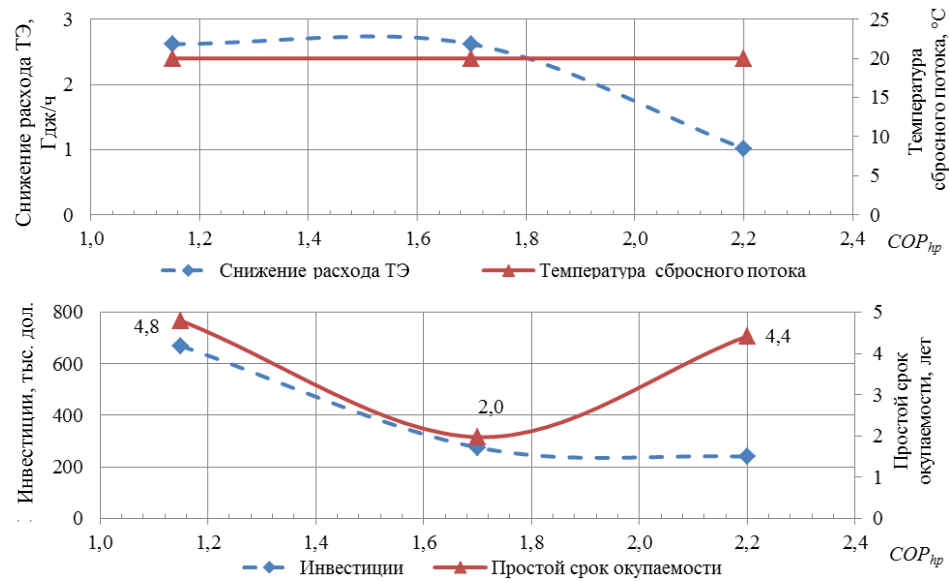


Рис. 9. Изменение показателей варианта модернизации по одноступенчатой схеме при отпуске избытков тепловой энергии стороннему потребителю после установки АБТН в зависимости от энергетического КПД АБТН

Fig. 9. The single-stage scheme modernization variant parameters alteration with excess heat energy output to off-site customers after installing the ABHP in terms of the ABHP energy efficiency

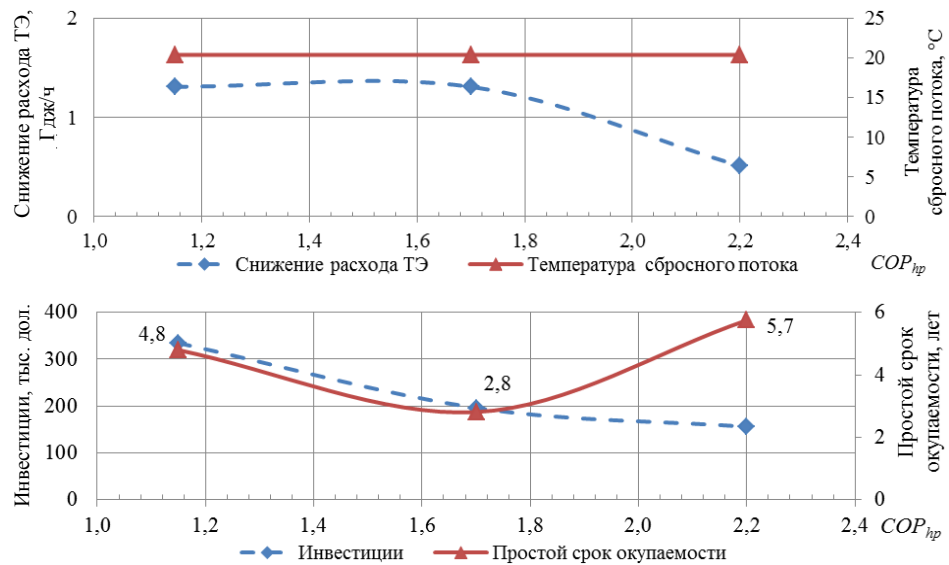


Рис. 10. Изменение показателей варианта модернизации по двухступенчатой схеме при отпуске избытков тепловой энергии стороннему потребителю в зависимости от энергетического КПД АБТН

Fig. 10. The two-stage scheme modernization variant parameters alteration with excess heat energy output to off-site customers in terms of the ABHP energy efficiency

Таблица 2

Основные показатели по вариантам модернизации при условии отпуска избытков тепловой энергии стороннему потребителю**Major parameters by the variants of modernization on condition of excess heat energy output to off-site customers**

Наименование показателя	Обозначение	Положение		
		Существующее	после модернизации	
			линии по одноступенчатой схеме*	линии по двухступенчатой схеме*
Энергетический КПД, %	η_z	0,8	44,4	19,4
Степень термодинамического совершенства технической системы, %	ν	85,0	89,6	88,4
Термодинамический КПД, %	η_e	0,112	15,2	6,2
Степень технологического совершенства, %	β	15,0	12,2	12,4
Степень полного совершенства технической системы, %	μ	0,0167	1,85	0,77
Эксергетический КПД $= \nabla E_{\text{пол}} / \nabla E_{\text{зат}}$, %	η_e^{**}	0,20	17,6	7,3
Удельные затраты энергии на тонну материала с учетом электроэнергии, ГДж/т	q	10,2	8,3	8,1
Удельные затраты эксергии на тонну материала, ГДж/т	e	2,9	2,5	2,3
Годовая экономия условного топлива, т	ΔB	—	600	580
Годовой отпуск ТЭ стороннему потребителю, ТДж	$Q_{\text{стор}}$		19,5	8,33
Простой срок возврата инвестиций, лет	τ	—	2,0	2,1
* Пояснения линии расширенной структуры (рис. 8).				
** Эксергетический КПД, определяемый по принятым полезным эффектам и затратам эксергии [15].				

ВЫВОДЫ

1. Проведен всесторонний термодинамический анализ энергообеспечения линий крашения и разработаны обоснованные рекомендации по развитию схем их энергоснабжения.

2. В результате расчетно-аналитических исследований удалось доказать:

– чрезвычайно низкую эффективность существующих схем энергообеспечения теплотехнологии крашения. Проведенные многовариантные расчеты с привлечением наиболее объективных методов термодинамического анализа позволили предложить пути повышения эффективности энергообеспечения рассматриваемых линий;

– потенциальную возможность (как в отделочных производствах, так и в масштабах отрасли в целом) повышения термодинамической эффективности энергоиспользования в 135 раз за счет смешанного применения энергии вторичных энергоресурсов.

3. Выработаны рекомендации по исправлению ситуации с энергообеспечением линий непрерывного крашения, которые позволяют снизить их энергопотребление в 1,3–1,5 раза.

4. В свете предстоящего ввода в систему белорусской АЭС, проводимой модернизации ТЭЦ и перевода их на парогазовую технологию, приводящую к увеличению в три раза удельной выработки электроэнергии на единицу отпущенной теплоты, показаны:

– актуальность и экономическая целесообразность утилизации энергии низкотемпературных побочных потоков отделочных производств и ее внешнее использование в контексте необходимости устранения диспропорции между структурами генерации в энергосистеме и потребления хозяйственным комплексом страны тепловой энергии и электроэнергии при нахождении предприятий в зоне теплоснабжения ТЭЦ;

– необходимость и первоочередность значительного снижения расхода топлива на сопряженных ТЭЦ и котельных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк, В. Н. Эксергия текстильных материалов / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 3. С. 46–59.
2. Романюк, В. Н. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах. Ч. 1 / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Наука и техника. 2015. № 4. С. 67–74.
3. Романюк, В. Н. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах. Ч. 2 / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Наука и техника. 2015. № 5. С. 63–75.
4. Романюк, В. Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / В. Н. Романюк; БНТУ. Минск, 2010. 365 с.
5. Гельперин, Н. И. Тепловой насос / Н. И. Гельперин. Л.: Госнаучтехиздат, 1931. 152 с.
6. Холодильные машины / Н. Н. Кошкин [и др.]; под общ. ред. И. А. Сакуна. Л.: Машиностроение, 1985. 510 с.
7. Van de Bor, D. M. Low Grade Waste Heat Recovery Using Heat Pumps and Power Cycles / D. M. van de Bora, C. A. Infante Ferreira, A. A. Kiss // Energy. 2015. Vol. 89. P. 1–10.
8. Sarkar, J. Experimental Analysis of Energy Performance of Modified Single-Stage CO₂ Transcritical Vapour Compression Cycles Based on Vapour Injection in the Suction Line / J. Sarkar, S. Bhattacharyya, M. Ramgopal // International Journal of Energy Research. 2009. Vol. 33. P. 100–109.
9. A Transcritical CO₂ Heat Pump for Simultaneous Water Cooling and Heating: Test Results and Model Validation / R. Cabello [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 47. P. 86–94.
10. Technical and Economic Working Domains of Industrial Heat Pumps: Part 1 – Single Stage Vapour Compression Heat Pumps / T. Ommen [et al.] // International Journal of Refrigeration. 2015. Vol. 55. P. 168–182.
11. Chua, K. J. Advances in Heat Pump Systems: a Review / K. J. Chua, S. K. Chou, W. M. Yang // Applied Energy. 2010. Vol. 87, No 12. P. 3611–3624.
12. Hepbasli, A. A Review of Heat Pump Water Heating Systems / A. Hepbasli, Y. Kalinci // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, No 6–7. P. 1211–1229.
13. Löffler, M. K. Trapezoid Vapour Compression Heat Pump Cycles and Pinch Point Analysis / M. K. Löffler // International Journal of Refrigeration. 2015. Vol. 54. P. 142–150.
14. Романюк, В. Н. К вопросу о повышении эффективности энергообеспечения линии непрерывного крашения предприятий легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Энергия и Менеджмент. 2015. № 5. С. 3–11.
15. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.

16. Ключников, А. Д. Интенсивное энергосбережение: предпосылки, методы, следствия / А. Д. Ключников // Теплоэнергетика. 2000. № 11. С. 12–16.

Поступила 27.07.2015 Подписана в печать 21.10.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Romaniuk V. N., & Muslina D. B. (2015) Exergy of Textile Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 3, 46–59 (in Russian).
2. Romaniuk V. N., & Muslina D. B. (2015) Forecasting of Production Output for Light Industry Enterprises with Purpose of Determine their Power Resources Requirements (Part 1). *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 4, 67–74 (in Russian).
3. Romaniuk V. N., & Muslina D. B. (2015) Forecasting of Production Output for Light Industry Enterprises with Purpose of Determine their Power Resources Requirements (Part 2). *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 5, 63–75 (in Russian).
4. Romaniuk V. N. (2010) *Intensivnoe Energoberezhenie v Teplotekhnologicheskikh Sistemakh Promyshlennogo Proizvodstva Stroitel'nykh Materialov. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Intensive Energy Saving in the Thermotechnological Systems of Industrial Production of Constructional Materials. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk. 365 p. (in Russian).
5. Gelperin N. I. (1931) *Thermal Pump*. Leningrad, Gosnauchtechizdat. 152 p. (in Russian).
6. Koshkin N. N., Sakun I. A., Bambushek, E. M., Bukharin, N. N., Gerasimov, E. D., Il'in, A. Ia., Pekarev V. I., Stukalenko A. K., & Timofeevskii L. S. (1985). *Refrigerating Machines*. Leningrad, Mashinostroenie. 510 p. (in Russian).
7. Van de Bor D. M., Infante Ferreira C. A., & Kiss A. A. (2015) Low Grade Waste Heat Recovery Using Heat Pumps and Power Cycles. *Energy*, 89, 1–10. DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.030.
8. Sarkar J., Bhattacharyya S. & Ramgopal M. (2009) Experimental Analysis of Energy Performance of Modified Single-Stage CO₂ Transcritical Vapour Compression Cycles Based on Vapour Injection in the Suction Line. *International Journal of Energy Research*, 33, 100–109. DOI: 10.1002/er.1476.
9. Cabello R., Sánchez D., Patiño J., Llopis R., & Torrella E. (2012) A Transcritical CO₂ Heat Pump for Simultaneous Water Cooling and Heating: Test Results and Model Validation. *Applied Thermal Engineering*, 47, 86–94. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.031.
10. Ommen T., Jensen J. K., Markussen W. B., Reinholdt L., & Elmegaard B. (2015) Technical and Economic Working Domains of Industrial Heat Pumps: Part 1 – Single Stage Vapour Compression Heat Pumps. *International Journal of Refrigeration*, 55, 168–182. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.02.012.
11. Chua K. J., Chou S. K., & Yang W. M. (2010) Advances in Heat Pump Systems: a Review. *Applied Energy*, 87 (12), 3611–3624. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.06.014.
12. Hepbasli A., & Kalinci Y. (2009) A Review of Heat Pump Water Heating Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (6–7), 1211–1229. DOI: 10.1016/j.rser.2008.08.002.
13. Löffler M. K. (2015). Trapezoid Vapour Compression Heat Pump Cycles and Pinch Point Analysis. *International Journal of Refrigeration*, 54, 142–150. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.03.003.
14. Romaniuk V. N., & Muslina D. B. (2015) On Increasing Energy Supply Effectiveness of Chain Dyeing Lines in the Light Industry Enterprises. *Energiia i Menedzhment* [Energy and Management], 5, 3–11 (in Russian).
15. Brodyanskiy V. M., Fratsher V., & Mikhalek K. (1998) *Exergy Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat. 288 p. (in Russian).
16. Klyuchnikov A. D. (2000) Intensive Energy Saving: Prerequisites, Methods, Consequences. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 11, 12–16 (in Russian).

Received: 27 July 2015

Accepted: 21 Oktober 2015

Published online: 16 December 2015

УДК 621.7

Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения технологий газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки

О. Е. Грачев¹⁾, В. М. Неуймин¹⁾, Д. В. Настека¹⁾

¹⁾ООО «Технологические системы защитных покрытий» (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации тепломеханического оборудования ТЭС рассматривается на примере газотермического метода упрочнения рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин. Рабочие лопатки эксплуатируются в условиях высокого силового нагружения, эрозионно-коррозионного разрушения поверхности пера лопатки со стороны влажно-парового потока. Часть эрозионно изношенных рабочих лопаток может быть восстановлена ремонтными компаниями путем использования целого ряда технологий: аргонодуговой, плазменной и газопорошковой наплавки основного материала с последующей мехобработкой, восстановления стеллитовой защиты, электроискрового легирования поверхностного слоя входной кромки, нанесения ионно-плазменных покрытий на поверхность пера лопатки. В отечественном турбостроении рабочие лопатки последних ступеней паровых турбин изготавливаются из сталей мартенситного класса. Важным условием успешного восстановления лопатки является минимизация теплового воздействия на основной материал для исключения возможного формирования зон подкалки. Технология лазерной наплавки позволяет создать такие условия. На поверхность обрабатываемой детали наносится покрытие путем расплавления основы и присадочного материала. Поскольку основа подплавляется минимально, свойства покрытия зависят главным образом от свойств присадочного материала. Процесс лазерной наплавки протекает в несколько стадий, включающих создание физического контакта, химического взаимодействия (поглощения лазерного излучения), объемные процессы с образованием прочных связей в объеме провзаимодействовавших материалов. Для дополнительной защиты от эрозионного разрушения рабочих лопаток ступеней цилиндра низкого давления ООО «Технологические системы защитных покрытий» разработана технология нанесения защитного покрытия пера лопатки методом высокоскоростного газопламенного напыления. Данная технология реализована компанией в 2012 г. при ремонте турбины К-200-12,8 (Ленинградский металлургический завод) на Заинской ГРЭС ОАО «Татэнерго» (упрочнение поверхности пера рабочей лопатки проводится без выемки облопаченного ротора из цилиндра низкого давления). По данным ГРЭС, на начало 2015 г. следов эрозионного износа рабочих лопаток не обнаружено.

Ключевые слова: газотермическое нанесение покрытия, лазерная наплавка, оборудование ТЭС, рабочие лопатки

Для цитирования: Грачев, О. Е. Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения технологий газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки / О. Е. Грачев, В. М. Неуймин, Д. В. Настека // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 55–61

Адрес для переписки
Неуймин Валерий Михайлович
ООО «Технологические системы
защитных покрытий»
ул. 16-я Парковая, 27,
105484, г. Москва, Российская Федерация
Тел.: (926) 521-00-75
neva333@yandex.ru

Address for correspondence
Neuimin Valeriy. M.
LLC 'Technological Systems
of Protective Coating'
16th Parkovaya str., 27,
105484, Moscow, Russian Federation
Tel.: (926) 521-00-75
neva333@yandex.ru

Increasing Efficiency of Repairing, Manufacturing and Operation of the TPP Facilities by Technology of Gas-Thermal Coating and Laser Surface Melting

O. E. Grachev¹⁾, V. M. Neuimin¹⁾, D. V. Nasteka¹⁾

¹⁾LLC 'Technological Systems of Protective Coating' (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The article considers effectiveness increase of the TPP heat-mechanical equipment repair, manufacturing and maintenance as exemplified by gas-thermal technique for hardening last-stages rotor blades of the steam turbines. The rotor blades work under conditions of intense power loading, their airfoil being erosion-corrosion destructed by the action of the moist-steam flow. Repairing companies employ quite a number of technologies to restore some of erosion-worn rotor blades. Inter alia, argon-arc, plasma and gas-powder weld deposition of the original material with subsequent machining, stellite protection recovery, electrical spark alloying the entry edge mat surface, spraying ion-plasma coating on the blade airfoil surface. In domestic turbine building, rotor blades of the steam turbines last stages are manufactured of martensitic class stainless steel. The key condition for successful blade restoration is thermal effect minimizing on the base material for excluding the slag areas possible forming. The laser surface coating technology provides these conditions. They coat the surface of an item being processed by way of melting the base and the adding material. In as much the base melts smallest, the coating characteristics depend mainly on the properties of adding material. The procedure of laser coating passes through several stages including physical contact creation, chemical interaction (laser radiation absorption), volumetrical processes resulting in formation of stable bonds in volume of the materials that have reacted. For the low-pressure cylinder rotor blades supplementary protection against erosion destruction, LLC 'Technological Systems of Protective Coating' developed technology of the blade airfoil protective finish by method of high-speed gas-flame sputter. The company realized this technology in 2012 during K-200-12,8 turbine (of the Leningrad Metallurgical Works – LMZ) repairing in Zainsk SDPP by JSC 'Tatenergo'. The feature of the technology is performing the rotor blade airfoil surface hardening without extracting the rotor out of the low-pressure cylinder and with rotor blades remaining on the rotor. According the SDPP data, as for the beginning of 2015 there are no traces of the rotor blade erosive wear detected.

Keywords: gas-thermal coating process, laser surface melting, TTP facilities, rotor blades

For citation: Grachev O. E., Neuimin V. M., & Nasteka D. V. Increasing Efficiency of Repairing, Manufacturing and Operation of the TPP Facilities by Technology of Gas-Thermal Coating and Laser Surface Melting. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 55–61 (in Russian)

В статье рассматривается новый для российского энергомашиностроения способ упрочнения рабочих лопаток (РЛ) последних ступеней цилиндра низкого давления (ЦНД) паровых турбин ТЭС, предложенный ООО «ТСЗП». РЛ последних ступеней турбин эксплуатируются в условиях, характеризующихся высоким силовым нагружением, наличием коррозионно активных сред, эрозионным износом поверхности лопаток вследствие каплеударного воздействия на них влажно-парового потока [1].

В отсутствие достаточного финансирования многие ремонтные компании осуществляют ремонт РЛ, реализуют мероприятия, направленные на повышение срока их службы. Данная проблема решается ими за счет использования целого ряда технологий: аргонодуговой, плазменной и газопорошковой наплавки основного материала [2–4], электроискрового легирования поверхностного слоя входной кромки РЛ [5], нанесения

ионно-плазменных покрытий на поверхность пера лопатки [6], а также припайки стеллитовых пластин [7, 8].

Поскольку основными материалами, традиционно используемыми в отечественном турбостроении, по ГОСТ 18968–73 являются стали мартенситного класса марок 12X13, 20X13, 15X11МФ, существенное условие успешного проведения операции восстановления РЛ – это минимизация теплового воздействия на основной материал для исключения формирования зон подкалки. Такое возможно при использовании технологий лазерной наплавки, которая заключается в нанесении на поверхность обрабатываемого изделия покрытия путем расплавления основы и присадочного материала. Вследствие того что основа подплавляется минимально, свойства покрытия главным образом зависят от свойств присадочного материала. При этом процесс лазерной наплавки проходит в несколько стадий, включающих создание физического контакта, химического взаимодействия (поглощения лазерного излучения), протекание объемных процессов с образованием прочных связей в объеме провзаимодействовавших материалов.

Активация контактной поверхности при наплавке основы осуществляется путем воздействия сфокусированного излучения, вызывающего локальный нагрев с образованием ванны расплава, в которую подается присадочный материал. При этом подача присадочного материала проходит по приведенной на рис. 1 схеме.

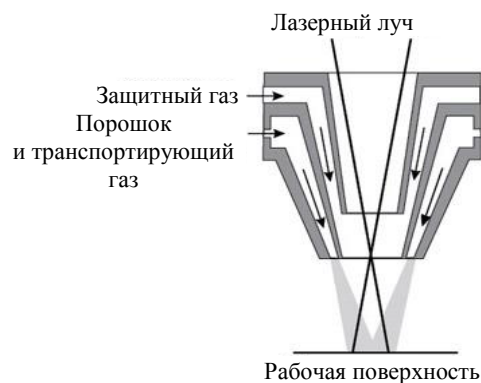


Рис. 1. Схема подачи присадочного материала в ванну расплава при лазерной наплавке

Fig. 1. The feeding diagram of adding material to the molten pool at overlaying laser welding

Высокая концентрация энергии в пятне нагрева создает возможность проведения процесса при повышенных скоростях обработки, обуславливающих:

- формирование наплавленного слоя с малым коэффициентом перемешивания $\gamma = 0,05-0,15$ в результате незначительного подплавления основы;
- минимальное термическое воздействие на основной материал, что особенно важно для материалов, претерпевающих структурные и фазовые превращения;
- малые остаточные деформации наплавленных деталей.

Процесс лазерной наплавки выполняется при помощи лазерной установки типа LDF 6000, обладающей следующими техническими характеристиками:

- тип лазера – твердотельный, диодный;
- длина волны – 900–1030 нм;
- максимальная мощность излучения – 6 кВт;
- фокусное расстояние – 250 мм;
- форма и размер луча в фокусе – круглая Ø3,13 мм или прямоугольник размером 16×3 мм.

Для восстановления геометрии входной кромки РЛ применяли присадочный материал, схожий по химическому составу с материалом основы. Перед наплавкой стеллитовые пластины удаляли, остатки дефектных слоев на РЛ зачищали абразивным кругом в зоне подбандажного промыва и прилегающих к ней зонах. Предварительно перед наплавкой проводили выборку материала основы в зоне подбандажного промыва лопатки. Затем лопатку устанавливали в специализированной оснастке, закрепленной на планшайбе поворотного стола. Процесс наплавки выполнялся по заранее разработанной управляющей программе при помощи промышленного автоматизированного робота, входящего в состав комплекса лазерной наплавки.

Проведено металлографическое исследование контрольных образцов стали 20Х13 с наплавкой схожего по химическому составу присадочного материала. Полученная микроструктура шлифа, показанная на рис. 2, характеризуется однородностью наплавки, отсутствием зон несплавления, а также трещин и дефектов. Твердость наплавленного слоя составила 50–52 HRC. Величина зоны термического влияния варьируется в пределах 200–400 мкм, что является отличительной особенностью метода лазерной наплавки.

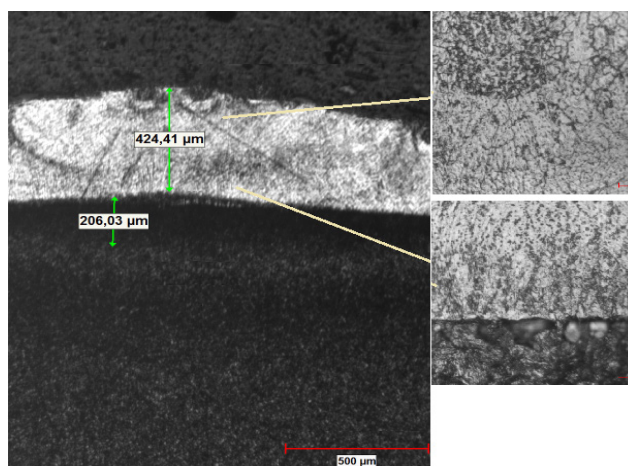


Рис. 2. Микроструктура контрольного образца стали марки 20Х13

Fig. 2. Microstructure of the 20Kh13 steel reference sample

В процессе наплавки распространение температурного поля по материалу основы, а также температуру пера РЛ в нескольких точках контроли-

ровали с помощью тепловизора. Полученные данные помогли подобрать оптимальную траекторию движения лазерного луча по поверхности заготовки лопатки для восстановления ее геометрии с целью не допустить значительного нагрева материала основы и образования зон подкалки.

В последующем восстановленный участок пера РЛ механически обрабатывали до требуемых размеров (рис. 3), контроль наплавленного слоя на наличие трещин проводили методом цветной дефектоскопии (рис. 4).



Рис. 3. Восстановленное перо РЛ турбины К-300-23,5
Ленинградского металлургического завода (ЛМЗ)

Fig. 3. Restored RB (rotor blades) airfoil of K-300-23,5
Leningrad Metallurgical Works (LMZ) turbine

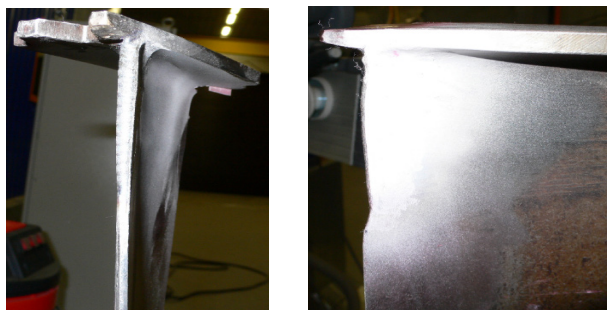


Рис. 4. Результаты цветной дефектоскопии восстановленной части пера РЛ
турбины К-300-23,5 (ЛМЗ)

Fig. 4. The dye penetrant inspection results for the restored RB airfoil portion
of K-300-23,5 (LMZ) turbine

После восстановления геометрии РЛ восстанавливали слой стеллита с использованием технологии лазерной наплавки. При этом формирование наплавленного слоя осуществляли с минимальными остаточными напряжениями, что позволяло сохранить первоначальный профиль РЛ. Контроль качества РЛ осуществляли путем контроля технологических параметров процесса (для 100 % заготовок), капиллярной дефектоскопии и контроля зон подкалки с использованием прибора типа ЗОНД ВД-96.

В настоящее время данная технология ремонта РЛ проходит апробацию на базе филиала ремонтно-сервисного предприятия ОАО «КВАРЦ

Групп» (Кострома). Проведенные Московским энергетическим институтом в апреле 2015 г. исследования на образцах показали повышение стойкости наплавки порошкового стеллита к абразивному износу под воздействием влажно-парового потока с частицами влаги размером 800 мкм по сравнению со стойкостью припаянных стеллитовых пластин на входную кромку РЛ в семь и более раз.

Для дополнительной защиты от эрозионного разрушения РЛ последних ступеней паровых турбин ООО «ТЭСЗП» разработана технология нанесения защитного покрытия методом высокоскоростного газопламенного напыления. Данная технология реализована компанией в 2012 г. в период ремонта турбины К-200-12,8 (ЛМЗ) на Заинской ГРЭС ОАО «Татэнерго». Работы по упрочнению поверхностей РЛ двух последних ступеней ЦНД были выполнены на облопаченном роторе [9].

Время нанесения покрытия на облопаченное колесо турбинной ступени составило до одной недели при односменной работе трех человек. При осмотре РЛ турбины К-200-12,8 (ЛМЗ) в январе 2015 г., через два года после нанесения упрочняющего покрытия и последующей эксплуатации турбины, не выявлено следов его повреждения (эрозионного разрушения покрытия).

Газотермические технологии нанесения покрытий [10] могут быть применены в электроэнергетике при ремонте турбин, например для восстановления и упрочнения поверхностей посадки деталей и сборочных единиц, восстановления баббитовых подшипников, нанесения прирабатываемых покрытий взамен изношенных концевых и надбандажных уплотнений, а также для защиты элементов конструкций запорной и регулирующей арматуры ТЭС и других деталей.

ВЫВОД

Использование современных технологий нанесения покрытий методами газотермического напыления и наплавки позволяет существенно повысить качество ремонта и изготовления рабочих лопаток последних ступеней цилиндра низкого давления паровых турбин ТЭС, продлить сроки службы деталей и сборочных единиц оборудования. Расширение применения новых технологий принесет в электроэнергетику повышение эффективности ремонтов, улучшение изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неуймин, В. М. О мерах по снижению эрозионного износа рабочих лопаток современных паровых турбин ТЭС / В. М. Неуймин // Энергетик. 2011. № 3. С. 15–20.
2. Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин. Ч. 1: Ремонт методом нанесения высокохромистой наплавки / Ф. А. Хромченко [и др.] // Сварочное производство. 1998. № 11. С. 19–23.
3. Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин. Ч. 2: Ремонт комбинированным способом сварки и наплавки / Ф. А. Хромченко [и др.] // Сварочное производство. 1999. № 2. С. 25–30.
4. Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин. Ч. 3: Усталостная прочность отремонтированных рабочих лопаток / Ф. А. Хромченко [и др.] // Сварочное производство. 1999. № 4. С. 6–7.
5. Беляков, А. В. Практика формирования электроискровых покрытий для упрочнения и восстановления лопаточного аппарата проточной части паровых турбин тепловых и

- атомных электростанций / А. В. Беляков, В. И. Шапин, А. Н. Горбачев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. Вып. 4. С. 1–9.
6. Рыженков, В. А. Повышение износостойкости оборудования паротурбинных установок электрических станций / В. А. Рыженков. М., 2002. 58 с.
 7. Яблоков, Л. Д. Паровые и газовые установки / Л. Д. Яблоков, И. Г. Логинов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 350 с.
 8. Перельман, Р. Г. Эрозия элементов паровых турбин / Р. Г. Перельман, В. В. Пряхин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 180 с.
 9. Прохоров, Д. В. Внедрение высокоскоростного газопламенного метода напыления защитного покрытия на лопатки последних ступеней турбины К-200-130 Заинской ГРЭС / Д. В. Прохоров // Энергоэффективность и энергосбережение: тр. XIII Междунар. симпози. под общ. ред. Е. В. Мартынова. Казань, 2012. Казань: Изд-во ООО «Скрипта», 2012. 512 с.
 10. Газотермическое напыление / Л. Х. Болдаев [и др.]; под общ. ред. Л. Х. Болдаева. 2-е изд. М.: ООО «Старая Басманная», 2015. 540 с.

Поступила 12.02.2015 Подписана в печать 10.04.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Neuimin V. M. (2011) On Reducing the Rotor Blade Erosive Wear of the TPP Modern Steam Turbines. *Energetik* [Power Engineer], 3, 15–20 (in Russian).
2. Khromchenko F. A., Lappa V. A., Fedina I. V., Karev A. N., & Dolzhanskii P. R. (1998) Repair Procedures for the Rotor Blades of Steam Turbines. Part 1. Repair by Method of High-Chromium Weld Deposition. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding Engineering], 11, 19–23 (in Russian).
3. Khromchenko F. A., Lappa V. A., Fedina I. V., Karev A. N., & Dolzhanskii P. R. (1999) Repair Procedures for the Rotor Blades of Steam Turbines. Part 2. Combined Repair Technique – Welding and Weld Deposition. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding Engineering], 2, 25–30 (in Russian).
4. Khromchenko, F. A., Komarov, V. A. Karev, A. N., & Dolzhanskii, P. R. (1999) Repair Procedures for the Rotor Blades of Steam Turbines. Part 3. Fatigue Strength of Reconditioned Rotating Blades. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding Engineering], 4, 6–7 (in Russian).
5. Belyakov A. V., Shapin V. I., & Gorbachev A. N. (2008) Practice of Forming Electrosparck Coating for Hardening and Restoring the Air-Gas Channel Blading of the Thermal and Nuclear Power Plant Steam Turbines. *Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 4, 1–9 (in Russian).
6. Ryzhenkov V. A. (2002) *Povyshenie Iznosostoikosti Oborudovaniia Paroturbinnnykh Ustanovok Elektricheskikh Stantsii. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Increasing Wearing Capacity of the Steam Turbine Plant Equipment of the Electric Power Stations. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow. 58 p. (in Russian).
7. Yablokov L. D., & Loginov I. G. (1988) *Steam Installations and Gas-Fired Plants*. Moscow, Energoatomizdat. 350 p. (in Russian).
8. Perelman R. G., & Pryakhin V. V. (1986) *Erosion of the Steam Turbine Elements*. Moscow, Energoatomizdat. 180 p. (in Russian).
9. Prokhorov D. V. (2012) Implementing the Technique of High-Speed Gas-Flame Sputter Coating for the Last Stages Blades of the K-200-130 Turbine in Zainsk SDPP. *Energy Efficiency and Energy Saving. Proceedings of XIII Intern. Symposium*. Kazan, Skripta, 2012, 512. (in Russian).
10. Baldaev L. Kh., Borisov V. N., Vakhalin V. A., Gannochenko G. I., Zatoka A. E., Zakharov B. M., Ivanov A. V., Ivanov V. M., Kalita V. I., Kudinov V. V., Puzriakov A. F., Sborshchikov Iu. P., Khamitsev B. G., Shkolnikov E. Ia., & Iaroslavtsev V. M. (2015) *Gas-Thermal Coating*. 2nd ed. Moscow, Staraya Basmanaya. 540 p. (in Russian).

Received: 12 February 2015 Accepted: 10 April 2015 Published online: 16 December 2015

УДК 338.45:621311:621.14 (476)

Методика расчета экономической эффективности инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла

А. Н. Кухоренко¹⁾

¹⁾ Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Максимальное распространение в энергетике Республики Беларусь и странах СНГ получили трехимпульсная система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла, а также ее модификации, которые имеют следующие недостатки: наличие статических ошибок регулирования в конце переходного процесса при отработке внутренних возмущений и возмущений расходом перегретого пара; большие отклонения уровня при резких и значительных изменениях нагрузки, что зачастую приводит к разгрузке или останову котла или энергоблока. Для устранения указанных недостатков ранее были разработаны инвариантные системы автоматического регулирования питания барабанного котла. Первый вариант инвариантной системы автоматического регулирования с выделением эквивалентного внешнего возмущения отличается от типовой тем, что структуру стабилизирующего регулятора выбирают на базе передаточной функции оптимального регулятора, а структуру и параметры динамической настройки корректирующего устройства с учетом эквивалентного объекта регулирования, включающего внутренний контур стабилизирующего регулятора. Во втором варианте предложена передаточная функция устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения, представленная в виде последовательно соединенных типовых звеньев: реального дифференциатора и звена быстрого реагирования. Для уменьшения максимальной величины регулирующего воздействия в этой схеме на выходе устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения дополнительно установлен ограничитель. Инвариантные системы автоматического регулирования устраняют статические ошибки регулирования при всех воздействиях и позволяют существенно улучшить качество поддержания уровня при переменных режимах. Для оценки экономической эффективности внедрения инновационной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане как системы предложена методика, которая позволяет рассчитать основные составляющие экономического эффекта от ее внедрения: повышение надежности (безотказности) работы котла; увеличение экономичности котла за счет существенного уменьшения времени отработки воздействий по сравнению с типовой системой автоматического регулирования и долговечности ее работы.

Ключевые слова: инвариантная система автоматического регулирования, барабан котла, уровень воды, экономическая эффективность внедрения

Для цитирования: Кухоренко, А. Н. Методика расчета экономической эффективности инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / А. Н. Кухоренко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 62–73

Адрес для переписки

Кухоренко Александр Николаевич
Научно-исследовательский институт
пожарной безопасности и проблем чрезвычайных
situations МЧС Республики Беларусь
ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 299-96-40
ank-17@ya.ru

Address for correspondence

Kuchorenko Alexsander N.
Research Institute of Fire Safety and Emergency
Situations Problems of the Ministry of Emergency
Situations of the Republic of Belarus
Soltys str., 183a,
220046, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 299-96-40
ank-17@ya.ru

Economic Efficiency Calculation Procedure for the Automatic Water-Level Regulating Invariant System in the Boiler Shell

A. N. Kuchorenko¹⁾

¹⁾Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations Problems of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The three-element system for automatic water-level regulation in the boiler shell as well as its modifications received maximal dissimulation in the Republic of Belarus and the CIS countries power economies. Though, they possess the following shortages: occurrence of the steady-state errors at the end of the transient process during the control response to internal disturbances and those by over-heated steam; large level deviations at sharp and significant load changes, which often leads to the boiler or the power block deloading or stoppage. As a remedial action against the mentioned disadvantages, the invariant systems for the drum boiler automatic feed regulation were developed earlier. The first variant of the automatic regulation invariant system with the equivalent external disturbance individualization differs from the typical one in the way that they select the stabilizing controller arrangement on the basis of transmission response of the optimal controller. And the compensating device dynamic settings structure and parameters are chosen with respect to the equivalent controlled member including the stabilizing controller inner contour. The second variant offers the compensating device transmission response to the equivalent external disturbance represented as series-connected typical sections: a real differentiator and a quick-response unit. For the control action maximum value reducing in this scheme, there is a suppressing device additionally installed at the exit of the equivalent external disturbance compensation device. The automatic regulation invariant systems eliminate steady-state errors at all impacts and allow improving significantly the level control quality at variable conditions. For economic efficiency evaluation of the boiler-shell water level automatic regulation innovative system implementation as a system, the author proposes a technique allowing calculating the main components of the economic effect of its implementation. Inter alia, increasing reliability (faultlessness) of the boiler operation, increment in the boiler efficiency at the expense of essential action-execution time decrease as compared with the typical automatic regulation system and longevity of its operation.

Keywords: automatic regulation invariant system, boiler shell, water level, economic efficiency of implementation

For citation: Kuchorenko A. N. Economic Efficiency Calculation Procedure for the Automatic Water-Level Regulating Invariant System in the Boiler Shell. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 62–73 (in Russian)

Основная задача энергетики – надежное снабжение промышленности и населения электрической и тепловой энергией. При этом главной опасностью, связанной с надежностью, является старение тепловых электростанций (ТЭС). Поэтому важное направление реализации Государственной комплексной программы развития энергетики Беларуси – модернизация основных производственных фондов, включающая не только модернизацию (реконструкцию) котлов и турбин, соответствующего вспомогательного оборудования, но и контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) с одновременным продлением срока службы существующих ТЭС с 30–40 до 50–60 лет [1].

Способность автоматизированного теплоэнергетического оборудования выполнять свои функции обычно выражают понятиями «надежность»

(«безотказность») и «долговечность» («срок службы») как технологического оборудования, так и самих технических средств автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП). При этом надежность характеризуется средним числом остановов, например котла, в единицу времени, произошедших в первую очередь из-за внезапных отказов, причиной которых является наличие ослабленных элементов металла (из-за дефектов металла, коррозии, неправильной эксплуатации), исчерпавших свой ресурс значительно раньше нормативного срока. После таких остановов поврежденный элемент заменяется, и работоспособность восстанавливается. Экономический эффект от модернизации системы автоматического регулирования (САР) уровня воды в барабане котла определяют, прежде всего, уменьшением ущерба, наносимого отказами и авариями, благодаря повышению надежности основного оборудования. Вместе с тем авария на одной ТЭС нарушает нормальную работу всей энергосистемы. Повышение качества регулирования снижает число отказов и аварий, увеличивает коэффициент готовности основного оборудования, позволяет уменьшить резерв установленной мощности в системе, уменьшает число аварий, обусловленных перепиткой котла и упуском уровня, а также частично предотвращает повреждения котла и турбины.

Долговечность характеризуется сроком службы элементов котла до их полной замены, вызванной исчерпанием ресурса службы у основной массы металла из-за накопления необратимых процессов разрушения. Так как замена некоторых участков (элементов) котла новыми при ликвидации внезапных отказов относится лишь к малой доли всего металла, то срок службы металла до замены не связан со средним числом внезапных отказов. Это позволяет проводить анализ надежности и долговечности отдельно.

Кроме отказов технологического оборудования ТЭС, учитывают также отказы технических средств АСУ ТП, например элементов САР, качество работы которых оказывает наибольшее влияние на экономичность, надежность и долговечность работы технологического оборудования ТЭС. При этом в замкнутый контур САР котел входит как основной ее элемент. Необходимо отметить, что при анализе внезапных отказов почти всегда удается установить причину отказа и отказавшее устройство. Вместе с тем при анализе безотказности САР учитывают также постепенные отказы, влияющие как на надежность, так и на долговечность котла. Устранение постепенных отказов производят путем изменения параметров настройки САР с помощью специально предназначенных для этого органов и рассматривают последние как отказы САР в целом. Как показали проведенные исследования, для аналоговых САР постепенных отказов больше (59 %), чем внезапных (41 %) [2].

Переход на более надежные микропроцессорные средства автоматики уменьшает число внезапных отказов САР до 38 %. Чрезвычайно жесткие требования предъявляются к качеству регулирования современных барабанных котлов. При этом зона работы САР питания обычно ограничена

пределами уставок защит от понижения уровня воды в барабане котла и открытия аварийного слива. Эти пределы определяют безопасность работы котла, превышение их вызывает аварийную ситуацию. Превышение верхнего аварийного предела может привести к забросу воды в пароперегреватель, резкому снижению температуры острого пара, гидравлическому и тепловому ударам и повреждению турбины. Падение уровня за нижний аварийный предел может повлечь нарушение циркуляции в экранных трубах и их пережог. Изменение уровня воды в барабане котла в допустимых пределах практически не оказывает влияния на работу котла. Долговечность металла барабана и водяного экономайзера, а также потребление электрической энергии питательными насосами зависят от качества регулирования расхода питательной воды. Резкие колебания расхода последней способствуют появлению усталостных явлений в металле барабана, снижая его надежность. Поэтому отклонения между производством пара и подачей питательной воды должны быть минимальными. Улучшение качества поддержания уровня воды в барабане котла в типовой трехимпульсной САР и ее модификациях при изменении нагрузки обычно достигается за счет резких глубоких изменений расхода питательной воды, что неприемлемо из-за усталостных напряжений в металле. Поэтому САР питания барабанного котла должны обеспечить удержание уровня воды в допустимых пределах:

- при стационарном режиме (при отсутствии резких возмущений по нагрузке) максимально допустимые отклонения по уровню не должны превышать ± 20 мм;
- при скачкообразном возмущении по нагрузке на 10 % (исходная нагрузка – номинальная) максимально допустимые отклонения по уровню не должны превышать ± 50 мм;
- при нормальном стационарном режиме работы котла число включений регулятора не должно превышать шести в минуту.

У современных котлов с высоким тепловым напряжением колебания уровня при резких и значительных изменениях нагрузки достигают существенного значения. Так, для котла ТМГ-94 сброс нагрузки на 40 % приводит к изменению уровня до 120 мм даже при максимальном регулирующем воздействии расходом питательной воды, произведенным с целью удержания уровня на заданном значении. Например, в Белорусской энергосистеме в 2013 г. произошли три подобных отказа (на Новополоцкой ТЭЦ – 02.10.2013, Светлогорской ТЭЦ – 05.10.2013 и Гродненской ТЭЦ-2 – 19.01.2013). Причиной останова котлов на указанных ТЭЦ при резких колебаниях нагрузки явилось «набухание» уровня в барабане котла при быстром снижении давления в главном паропроводе почти в два раза.

При глубоких внутренних и внешних возмущениях типовые регуляторы питания атомных электростанций (АЭС) не в состоянии обеспечить поддержание уровня воды в пределах границ нормальной эксплуатации, что приводит к разгрузке или полному останову энергоблока и появлению экономических убытков, а также к снижению надежности парогенератора.

Автоматический регулятор уровня воды парогенератора АЭС поддерживает завышенный уровень воды на рабочих нагрузках, что приводит к увеличению влажности пара и повышенному износу лопаточного аппарата турбины. Это снижает надежность и срок службы турбины.

Вместе с тем замена старых технических средств САР теплоэнергетических процессов на современные микропроцессорные с использованием типовых алгоритмов регулирования и традиционных структурных схем не позволяет существенно улучшить качество поддержания теплоэнергетических параметров ТЭС, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок. В связи с этим актуальными становятся задачи модернизации САР ТЭС на базе инновационных методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем, существенно влияющих на экономичность, надежность и долговечность работы ТЭС [3], и разработки методики расчета экономической эффективности их внедрения. В первую очередь это касается САР уровня воды в барабане котла, так как последние относят к первой группе наиболее сложных и ответственных САР, показатели безотказности и ремонтпригодности которых приведены в [2].

В настоящее время максимальное распространение в энергетике Республики Беларусь и странах СНГ получили трехимпульсная САР уровня воды в барабане котла, а также ее модификации (каскадная САР, САР с дифференцированием сигнала по разности расходов перегретого пара и питательной воды), которые имеют следующие недостатки: наличие трех датчиков (уровнемер, паромер и водомер); статические ошибки регулирования в конце переходного процесса при отработке внутренних возмущений и возмущений расходом перегретого пара; «набухание» уровня в барабане котла при изменении расхода перегретого пара; глубокие отклонения уровня воды в барабане из-за больших колебаний при резком сбросе паровой нагрузки.

Для устранения указанных недостатков разработаны инвариантные САР питания барабанного котла [4, 5]. Инвариантная система с выделением эквивалентного внешнего возмущения отличается от типовой тем, что структуру стабилизирующего регулятора выбирают на базе передаточной функции оптимального регулятора, структуру и параметры динамической настройки корректирующего устройства – на базе передаточной функции оптимального регулятора с учетом динамики эквивалентного объекта регулирования, включающего внутренний контур стабилизирующего регулятора [4, 6–8].

В [5] предложено устройство компенсации эквивалентного внешнего возмущения, передаточная функция которого представлена в виде последовательно соединенных типовых звеньев: реального дифференциатора и звена быстрого реагирования. Кроме того, в этой системе имеется один параметр динамической настройки, численное значение которого выбирают с использованием диаграммы Вышнеградского в точке, где система обеспечивает максимальное быстроедействие при отработке задания без

перерегулирования. Для уменьшения максимальной величины регулирующего воздействия расходом питательной воды в этой схеме на выходе устройства компенсации дополнительно установлен ограничитель. Однако при этом качество регулирования уровня воды в барабане котла существенно улучшается по сравнению с типовой САР питания и ее модификациями. При повышении качества регулирования с использованием инвариантной САР снижается не только уровень колебаний питательной воды в барабане котла, но и расход питательной воды, устраняются статические ошибки регулирования в конце переходных процессов, длительность которых существенно уменьшается. Это благоприятно влияет на работу жаропрочных сталей. Использование методов структурно-параметрической оптимизации САР позволяет влиять на скорость изменения уровня воды в барабане котла, а следовательно, и температуру металла систем барабана. Это уменьшает перепады температуры и скорость ее изменения в барабане, а также способствует предотвращению усталостных повреждений за счет уменьшения концентрации напряжений трубных отверстий и в других местах. Номинальные напряжения, вызванные в кромках отверстий барабана, зависят как от внутреннего давления в барабане, его внутреннего диаметра, толщины стенки, так и обусловлены разностью температур верхней и нижней образующих барабана с учетом характера распределения температуры по периметру поперечного сечения барабана, который зависит от положения уровня воды в барабане, интенсивности теплоотдачи от воды к стенке и т. д.

Для принятия решения о модернизации САР уровня воды в барабане конкретного котла на базе современных методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем или обоснования раздела Государственной комплексной программы развития энергетики Беларуси необходимо провести оценку «эффект – затраты» выбранных альтернатив, т. е. найти оптимальное соотношение «выход – вход» с использованием предлагаемой методики. Здесь в качестве «входа» принимают величину инвестиций (капитальных и текущих затрат), а «выхода» – годовой экономический эффект от внедрения. Оценка требуемых инвестиций на модернизацию САР питания конкретного барабанного котла ТЭС или парогенератора АЭС целесообразно проводить по методике, приведенной в [9].

Капитальные затраты на обоснование дополнительного раздела Государственной комплексной программы развития энергетики Беларуси (объем внедрения инвариантных САР уровня воды в барабане – 234 котла) рассчитывают по методике, учитывающей стоимость 1 кВт установленной мощности, вид топлива, вероятностный фактор износа, фактор уровня необходимых усилий для продления срока службы котла, дополнительные затраты на проектирование, монтаж и наладку, а также долю затрат на САР уровня воды в барабане котла в общих затратах на КИПиА котла [1]

$$\text{ПКЗ} = \gamma_1 \left[K_{\text{уд}} N_{\text{уст}} \gamma_2 \Phi \text{И} \cdot \Phi \text{У} \right], \quad (1)$$

где ПКЗ – прямые капитальные затраты на модернизацию САР уровня воды в барабане котла; γ_1 – доля капитальных затрат САР питания в общих

затратах на модернизацию КИПиА котла; γ_2 – доля капитальных затрат САР на КИПиА котлов в зависимости от вида топлива (для угольных котлов – 0,0101; для жидких – 0,0107; для газовых – 0,0164); $K_{уд}$ – удельные капитальные затраты на 1 кВт установленной мощности; $N_{уст}$ – установленная мощность котла; $\Phi И$ – показатель вероятностного фактора износа для КИПиА (0,9 – для всех видов топлива); $\Phi У$ – показатель фактора уровня усилий для КИПиА (0,33 – для всех видов топлива).

С учетом составляющих годового экономического эффекта $\mathcal{E}_г$ от модернизации САР технологических процессов ТЭС, приведенных в [9], применительно к регуляторам питания, работающим в составе энергоблоков барабанных котлов, необходимо учесть следующие факторы, обусловленные показателями экономичности и надежности работы основного оборудования ТЭС и АЭС:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_г = & \Delta Z_{сн} + \Delta Z_{нед} + \Delta Z_{рез} + \Delta Z_{эк} + \Delta Z_{рем} + \Delta Z_{вм} + \Delta Z_{нто}^o + \\ & + \Delta Z_{нто}^c + \Delta Z_{на}^o + \Delta Z_{на}^c + \Delta Z_{тр} + \Delta Z_a^A + \Delta Z_a^{то} + \Delta K_{сл}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_г$ – годовой экономический эффект от внедрения инвариантной САР; $\Delta Z_{сн}$ – экономия энергии на собственные нужды регулятора питания; $\Delta Z_{нед}$ – экономия за счет уменьшения величины ущерба от недоотпуска энергии потребителям; $\Delta Z_{рез}$ – изменение затрат, обусловленных наличием резервной мощности в энергосистеме; $\Delta Z_{эк}$ – то же затрат покрытия дефицита энергии резервной электростанцией в связи с вынужденным простоем более экономичного блока; $\Delta Z_{рем}$ – то же на вынужденные ремонты и пуски; $\Delta Z_{вм}$ – изменение расхода вспомогательных материалов; $\Delta Z_{нто}^o$ – экономия за счет повышения уровня надежности технологического оборудования, отказ которого ведет к останову оборудования; $\Delta Z_{нто}^c$ – то же надежности технологического оборудования, отказ которого ведет к снижению нагрузки котла (частичные отказы); $\Delta Z_{на}^o$ – экономия от изменения надежности аппаратуры регулирования, отказ которой приводит к останову котла; $\Delta Z_{на}^c$ – то же, отказ которой приводит к снижению нагрузки котла; $\Delta Z_{тр}$ – экономия от изменения трудозатрат на обслуживание технологического оборудования и аппаратуры автоматики; ΔZ_a^A – то же затрат на амортизационные отчисления и текущие ремонты аппаратуры автоматики; $\Delta Z_a^{то}$ – то же затрат на амортизационные отчисления и текущие ремонты технологического оборудования; $\Delta K_{сл}$ – экономия затрат от изменения срока службы элемента, узла или агрегата.

В качестве базы для сравнения вариантов предлагается использовать показатели, характеризующие экономичность и надежность типовой САР уровня воды в барабане котла или ее модификаций (средняя наработка на отказ или показатель интенсивности отказов, обратный средней наработке на отказ; среднее время восстановления и эквивалентный коэффициент вынужденных отказов), т. е. системы, состоящей из технических средств САР и котла в качестве объекта регулирования с учетом показателей качества регулирования уровня воды при основных воздействиях (полное время регулирования, максимальная величина перерегулирования, максимальная динамическая ошибка регулирования, максимальная величина регулирующего воздействия при изменении нагрузки котла).

На качество регулирования уровня воды в барабане котла влияют многие факторы, в том числе изменение расхода питательной воды, нагрузки потребителя, расхода топлива, температуры питательной воды и др. Но при этом наибольшее влияние на качество регулирования уровня воды в барабане котла оказывают структурная схема и параметры оптимальной динамической настройки регулятора питания. Численные значения указанных показателей качества регулирования получают путем моделирования переходных процессов типовых (базовых) САР при основных воздействиях (скачок задания, внутреннее возмущение, возмущение расходом перегретого пара с явлением «набухания» уровня), после чего сравнивают с аналогичными показателями модернизированных (инвариантных) САР уровня воды в барабане котлов, которые значительно лучше за счет изменения структурной схемы САР и выбора оптимальных параметров динамической настройки.

Сравнительный анализ результатов моделирования типовых САР уровня воды в барабане котла с предлагаемыми инвариантными системами показал, что полное время отработки возмущающих воздействий уменьшается в среднем более чем в три раза; максимальная динамическая ошибка регулирования уровня воды в барабане котла при скачкообразном изменении нагрузки котла уменьшается более чем в пять раз; полностью устраняются статические ошибки регулирования [4, 5]. При этом максимальная величина регулирующего воздействия меньше типовой САР на 15 %.

Интенсивность отказов λ_c собственно котла и технических средств реализации инвариантной САР уровня воды в барабане котла для базового и модернизированного вариантов определяют как сумму интенсивностей отказов каждого компонента системы [1]

$$\lambda_c = \lambda_{ка} + \lambda_{тс} = \frac{1}{T_0^{ка}} + \frac{1}{T_0^{тс}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{ка}$ – интенсивность отказов котла; $\lambda_{тс}$ – интенсивность отказов технических средств САР; $T_0^{ка}$ – наработка на отказ котлов белорусских

электростанций в период 1994–1996 гг. составила 3533–4180 ч [10] (среднее значение 3857 ч; с учетом процента износа котлов белорусских электростанций в настоящее время максимальная наработка на отказ увеличилась до 4820 ч); $T_0^{\text{тс}}$ – средняя наработка на отказ технических средств типового регулятора питания барабанного котла по данным, приведенным в [2], с учетом постепенных отказов находится в пределах 755–865 ч (среднее значение 810 ч).

При этом среднее время восстановления котла составило $T_{\text{в}}^{\text{ка}} = 55$ ч [10], а технических средств САР $T_{\text{в}}^{\text{тс}} = 1$ ч [2].

С учетом трехкратного повышения быстродействия инвариантной САР при отработке основных воздействий среднее время наработки на отказ технических средств

$$T_0^{\text{тс ИСАР}} = \frac{755 + 865}{2} \cdot 3 = 2430 \text{ ч.} \quad (4)$$

С учетом средней наработки котлов на отказ по формуле (3) определяли значение интенсивности отказов систем в целом:

$$\lambda_{\text{трп}} = \frac{1}{T_0^{\text{тс трп}}} + \frac{1}{T_0^{\text{ка}}} = \frac{1}{810} + \frac{1}{3857} = 0,00149; \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{ИСАР}} = \frac{1}{T_0^{\text{тс ИСАР}}} + \frac{1}{T_0^{\text{ка}}} = \frac{1}{2430} + \frac{1}{4820} = 0,000619, \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{трп}}$, $\lambda_{\text{ИСАР}}$ – интенсивность отказов типового регулятора питания и инвариантной САР соответственно.

С учетом (5) и (6) значение наработки на отказ в целом составит:

- для типовой САР

$$T_0^{\text{трп}} = \frac{1}{\lambda_{\text{трп}}} = 671 \text{ ч;} \quad (7)$$

- для инвариантной САР

$$T_0^{\text{ИСАР}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ИСАР}}} = 1616 \text{ ч.} \quad (8)$$

Общее количество отказов типовой САР с учетом числа часов использования установленной мощности составит $n_{\text{с}}^{\text{н баз}} = 8,2$, а инвариантной – $n_{\text{с}}^{\text{н ИСАР}} = 3,4$. Время наработки на отказ инвариантной САР уменьшается по сравнению с типовой в 2,4 раза, а количество отказов сокращается на 58,7 %. При этом с использованием соответствующих формул [1, 10]

эквивалентный коэффициент готовности системы составит $K_{\text{э.гот}}^{\text{трп}} = 0,8473$, а инвариантной САР – $K_{\text{э.гот}}^{\text{ИСАР}} = 0,8867$. Таким образом, после модернизации эквивалентный коэффициент готовности инвариантной САР увеличится на 4,7 %. Это будет способствовать повышению надежности отпуска энергии в энергосистеме до $H = 0,996$ (норматив надежности в виде вероятности обеспечения покрытия электрической нагрузки потребителей для стран СНГ), т. е. до значений стран с развитой рыночной экономикой, например в Италии ($H = 0,995$) [10].

Экономия от расхода уменьшения электроэнергии на собственные нужды регулятора питания определяли по формуле

$$\Delta Z_{\text{уд}} = \Delta W_{\text{сн}} S_{\text{тз}}, \quad (9)$$

где

$$\Delta W_{\text{сн}} = \Delta W_{\text{сн}}^{\text{то}} + \Delta W_{\text{сн}}^{\text{САР}}; \quad (10)$$

$\Delta W_{\text{сн}}^{\text{то}}$, $\Delta W_{\text{сн}}^{\text{САР}}$ – соответственно изменение среднегодового расхода электроэнергии на собственные нужды регулятора питания; $\Delta W_{\text{сн}}$ – изменение среднегодового расхода электроэнергии на собственные нужды котла; $S_{\text{тз}}$ – топливная составляющая себестоимости электроэнергии.

Составляющая экономического эффекта $S_{\text{тз}}$ инвариантной САР уровня воды в барабане котла обусловлена сокращением числа включений электродвигателей привода питательного насоса и регулирующего питательного клапана (РПК) вследствие уменьшения времени отработки основных воздействий, снижая расход электроэнергии на собственные нужды котла. Кроме того, при внедрении инвариантной САР целесообразно использовать РПК с саморазгрузкой (в настоящее время на ТЭС ГПО «Белэнерго» такими клапанами оснащена только треть барабанных котлов), что позволяет существенно уменьшить установленную мощность электродвигателей РПК.

С учетом полученных данных по показателям надежности сравниваемых САР рассчитывают другие составляющие годового экономического эффекта, используя известные формулы в [1, 2, 9, 10].

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета экономической эффективности инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла, отличающаяся учетом не только внезапных, но и постепенных отказов, а также качественных показателей регулирования уровня воды типовой (базовой) и инвариантной (новой) систем автоматического регулирования при основных воздействиях.

2. Методика позволяет обосновать экономическую целесообразность модернизации типовой системы автоматического регулирования уровня

воды конкретного котла или всех основных барабанных котлов ГПО «Белэнерго».

3. Приведенные расчеты показали, что внедрение инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла позволит увеличить время наработки на отказ системы (технические средства автоматизации котла) в 2,4 раза, уменьшить число отказов на 58,7 % и повысить эквивалентный коэффициент готовности системы автоматического регулирования котла на 4,7 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борушко, А. П. Надежность и эффективность электростанций (методы и практика) / А. П. Борушко, Н. Б. Карницкий, Г. А. Борушко. Минск: БНТУ, 2007. 182 с.
2. Исследование безотказности и стабильности систем автоматического регулирования / М. А. Ястребенецкий [и др.] // Теплоэнергетика. 1970. № 3. С. 20–24.
3. Кулаков, Г. Т. Состояние, проблемы и перспективы внедрения информационных технологий и базисных инноваций в области автоматизации тепловых и атомных электростанций Республики Беларусь / Г. Т. Кулаков // Проблемы и перспективы инновационного развития экономики: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. Алушта: Творческий союз научных и инженерных объединений (обществ) Крыма, 2012. С. 252–254.
4. Кулаков, Г. Т. Инвариантная система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 2. С. 35–47.
5. Кулаков, Г. Т. Инвариантная система автоматического регулирования питания барабанного парового котла / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 5. С. 59–68.
6. Влияние автоматического регулирования на надежность парогенераторов / А. С. Корецкий [и др.] // Теплоэнергетика. 1973. № 10. С. 46–50.
7. Попырин, Л. С. Методы обоснования надежности тепловых электростанций / Л. С. Попырин // Вестник электроэнергетики. 1997. № 1. С. 28–39.
8. Критерии надежности, используемые при планировании генерирующей мощности / Ю. Н. Балаков [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Иркутск, 1997. Вып. 49, Т. 1: Надежность систем энергетики: экономические и информационные аспекты. С. 49–56.
9. Кулаков, Г. Т. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС. Ч. 1, 2 / Г. Т. Кулаков, В. В. Кравченко, Ю. В. Макоско // Наука и техника. 2012. № 5. С. 92–97; 2013. № 2. С. 77–82.
10. Карницкий, Н. Б. Синтез надежности и экономичности теплоэнергетического оборудования ТЭС / Н. Б. Карницкий. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 227 с.

Поступила 24.06.2015 Подписана в печать 26.08.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Borushko A. P., Karnitskiy N. B., & Borushko G. A. (2007) *Power Station Reliability and Efficiency (Methods and Practice)*. Minsk: BNTU. 182 p. (in Russian).
2. Yastrebenetskiy M. A., Vasilevskiy R. G., Goldrin V. M., & Sobolev Ju. Ja. (1970) Investigation into Reliability and Stability of the Automatic Control Systems. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 3, 20–24 (in Russian).
3. Kulakov G. T. (2012) Status, Challenges and Perspectives of Implementing Information Technology and the Basis Innovations in the Area of Automation of the Thermal and Nuclear Po-

- wer Plants of the Republic of Belarus. *Challenges and Perspectives of Innovative Development of the Economy. Proceedings of XVII International Scientific-Practical Conference*. Alushta, Creative Union of scientific and Engineering Associations of the Crimea, 252–254 (in Russian).
4. Kulakov G. T., & Kuchorenko A. N. (2015) Invariant System of Automatic Water-Level Regulating in the Boiler Shell. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG*. [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 2, 35–47 (in Russian).
 5. Kulakov G. T., & Kuchorenko A. N. (2015) Invariant System of the Steam-Drum Boiler Feed Automatic Regulation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 5, 59–68 (in Russian)
 6. Koretskiy A. S., Oster-Miller Iu. R., Rinkus E. K., Foteeva L. V., & Khaberev N. N. (1973) Impact of the Automatic Regulation on Reliability of the Steam Generators. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 10, 46–50 (in Russian).
 7. Popyrin L. S. (1997) Thermal Power Plants Reliability Validation Methods. *Vestnik Elektroenergetiki* [Herald of Electric Power Industry], 1, 28–39 (in Russian).
 8. Balakov Yu. N., Lavrentev V. M., Neklepaev B. N., Shevchenko, A. T., & Shuntov A. V. (1997) Reliability Criterion Applied in Generating Capacity Planning. *Methodological Issues of Reliability Study of the Power Economy Large Systems. Series 49. Vol. 1. Power Economy Reliability: Economic and Information Aspects*, 49–56 (in Russian).
 9. Kulakov G. T., Kravchenko V. V., & Makosko Yu. V. (2012, 2013) Economical Efficiency Evaluation Technique of Implementing Innovation Systems in the TPP Automatic Control Systems. Part 1. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], 5, 92–97, 2, 77–82 (in Russian).
 10. Karnitskiy N. B. (1999) *Synthesis of Reliability and Efficiency of the Thermal Power Plant Equipment*. Minsk, VUZ-YuNITI. 227 p. (in Russian).

Received: 24 June 2015

Accepted: 26 August 2015

Published online: 16 December 2015

УДК 621.382.019.3

Анализ тепловых свойств линеек светодиодов методом переходных электрических процессов

С. А. Манего¹⁾, Ю. А. Бумай¹⁾, И. А. Хорунжий¹⁾, Ю. В. Трофимов²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий» НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Повышение энергоэффективности работы твердотельных осветительных устройств в народном хозяйстве Республики Беларусь является актуальной задачей. Современные проблемы энергоэффективного освещения многогранны и имеют широкий спектр. Особенно это актуально в условиях энергетического и мирового экономического кризиса. Так, на освещение в Беларуси расходуется 10–13 % от общего потребления электроэнергии. Таким образом, имеется значительный потенциал энергосбережения за счет перехода к энергоэффективному освещению. Рассмотрены вопросы надежности и долговечности работы твердотельных осветительных устройств, созданных на основе светодиодных линеек фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd. Оценка надежности оптоэлектронных приборов базируется на исследовании закономерностей развития механизмов деградации, приводящих к отказам того или иного типа. Выяснение причин деградации необходимо, чтобы затем, целенаправленно воздействуя на них, уменьшить скорость и величину деградации. Одной из основных причин деградации светодиодных устройств является температурный перегрев активной области светодиодного чипа. Поэтому актуальными становятся методы оценки тепловых характеристик твердотельных осветительных устройств. В статье исследованы тепловые свойства мощных синих светодиодных линеек методом переходных электрических процессов. Рассчитаны температуры активной области светодиодов в линейках при различных условиях теплоотвода и значениях токов инжекции. Проведено компьютерное моделирование тепловых полей линеек при нагреве с использованием пакета ANSYS. Установлено, что из-за степени неоднородности распределения температуры вдоль линейки следует невозможность выделения тепловых свойств элементов структуры чипов линейки на основе усредненных по всем светодиодам временных зависимостей температуры. Показано, что тепловые параметры линеек светодиодов с достаточной точностью можно получить, используя представление линейки только двумя эквивалентными RC-цепочками, соответствующими тепловым путям «активная область светоизлучающего светодиода – алюминиевая подложка» и «алюминиевая подложка – окружающая среда». Для данных областей определены тепловые постоянные времени, тепловые сопротивления и теплоемкости.

Ключевые слова: энергоэффективность, светодиоды, линейки светодиодов, тепловое сопротивление, теплоемкость, теплоотвод

Для цитирования: Анализ тепловых свойств линеек светодиодов методом переходных электрических процессов / С. А. Манего [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 74–86

Адрес для переписки

Манего Сергей Анатольевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-10-79
kaf_etf@dntu.by

Address for correspondence

Manego Sergey A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosti Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-10-79
kaf_etf@dntu.by

Analysis of Thermal Properties of the LED-Lines by Method of Electrical Transient Processes

S. A. Manego¹⁾, Bumai Yu. A.¹⁾, Khorunzhii I. A.¹⁾, Trofimov Yu. V.²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Republican Scientific-Production Unitary Enterprise 'Center of LED and Optoelectronic Technologies', National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Increasing the solid lighting facilities operational energy-efficiency in the national economy of the Republic of Belarus is of current concern. The modern problems of energy-saving lighting are multifaceted and broad-ranging. It is particularly burning amidst the energy crisis and the world commercial slump. Thus, the lighting demands 10–13 % of the total electric energy consumption in Belarus. That is to say, there is a significant potential of energy saving in transition to energy-efficient lighting. The paper considers the issues of reliability and service period of the solid-state lighting devices created on the basis of lines of light-emitting-diodes (LED) produced by Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd. The optoelectronic apparatuses reliability assessment is based on investigation of the development principles and deterioration mechanisms leading to failures of one kind or another. The deterioration causes ascertainment is indispensable for acting upon them later on and thus reducing the degradation speed and extent. One of the LED-devices deterioration main sources is the temperature overhear of the LED-chip active area. Therefore, techniques for evaluating the heat characteristics of solid lighting devices become the issue of the day. The article investigates thermal properties of high-capacity blue LED-lines by method of electrical transient processes. The authors calculate temperatures in the LED-lines active areas at various heat-dissipation conditions and injection currents values. They realize computer generated simulation of the heated lines thermal fields applying the ANSYS packet. The study concludes that out of the degree of temperature-distribution heterogeneity along the line impossibility of the line chip structural units thermal characteristics extraction arises based on all LEDs homogenized over the line temperature-time dependences. The paper indicates that one can with reasonable accuracy obtain the LED-lines thermal parameters employing the line representation with two equivalent RC-strings corresponding the thermal ways 'LED active area – aluminium base' and 'aluminium base – environment'. For these areas thermal time constants, thermal resistances and thermal capacities are determined.

Keywords: energy efficiency, light-emitting-diodes, LED-line, thermal resistance, heat capacity, heat dissipation

For citation: Manego S. A., Bumai Yu. A., Khorunzhii I. A., & Trofimov Yu. V. Analysis of Thermal Properties of the LED-Lines by Method of Transient Electric Processes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 74–86 (in Russian)

Введение

Появление эффективного светодиодного освещения согласно оценкам может привести к снижению затрат электроэнергии до 40 %, вследствие чего производство и использование неэффективных ламп накаливания в ряде стран запрещено законодательством [1]. Линейки мощных светоизлучающих светодиодов (СИД) широко используются в настоящее время для создания осветительных устройств различного назначения. Одним из основных параметров, определяющих срок службы мощных СИД и светодиодных устройств (СУ) на их основе, является температурный режим работы [2]. В связи с этим тепловому дизайну и, следовательно, методам определения температур активных областей СИД и СУ уделяется особое

внимание. Выбор надежной, технологичной, эффективной и дешевой методики контроля не только абсолютных величин температур активных областей СИД и СУ, но и изменения их в процессе эксплуатации актуален как в научном, так и в прикладном аспекте для оптимизации конструкторско-технологических режимов изготовления СУ по тепловым параметрам. Необходимо также отметить, что декларируемые фирмами-производителями тепловые параметры СУ не всегда соответствуют действительным значениям, что вызывает необходимость проводить дополнительное тестирование и выявление потенциально ненадежных в тепловом отношении устройств.

Для определения температуры СИД и СУ применяется широкий набор в основном косвенных методик [3]. Одним из наиболее простых для реализации (требующим всего лишь наличия программируемого источника питания или аналогичного устройства) является метод переходных электрических процессов, использующий саморазогрев СИД импульсом тока и анализ временной зависимости изменения прямого напряжения СИД. Данный метод позволяет определить не только температуру активной области СИД (в том числе в составе СУ), но и структуру тепловых сопротивлений R_i и теплоемкостей C_i элементов конструкции СИД и внешнего теплоотвода [4–11]. Определение указанных параметров базируется на аналогии процессов протекания электрического тока и распространения теплоты, основанной на изоморфизме описывающих эти процессы уравнений. В рамках данного метода процесс распространения теплоты моделируется с использованием последовательно соединенных параллельных RC цепочек – схемы Фостера, которая для получения значений тепловых сопротивлений и теплоемкостей элементов конструкции СИД должна быть преобразована в схему Кауера.

Вместе с тем, несмотря на многочисленные публикации по данному методу со всевозможными уточнениями и дополнениями и созданные специализированные установки по определению тепловых параметров элементов СИД и СУ, такие как, например, T3Ster и заложенные в них подходы [4–9], интерпретация временных зависимостей температур нагрева и временных спектров тепловых сопротивлений достаточно трудна и часто субъективна [12]. Основные проблемы, влияющие на результаты анализа в рамках данного метода, состоят в следующем. Распространение теплоты в большинстве случаев трехмерное, моделируется одномерной системой цепочек. Существуют трудности при разделении RC цепочек с близкими постоянными времени $\tau = RC$. Значительное влияние на результаты обработки временных зависимостей температур нагрева оказывают выбор временного интервала и шага измерений, шумы, а также усреднение по площади поверхности СИД. Использование процедуры преобразования схемы Фостера в более физическую схему Кауера до исчезновения остатка [13] приводит к тому, что в каждой последующей цепочке накапливается ошибка от предыдущей. Это сильно ограничивает количество цепочек для получения достоверных результатов и предъявляет повышенные требования к осуществлению математической обработки такой трансформации.

Все это приводит к тому, что метод переходных электрических процессов и интерпретация результатов измерений должны быть адаптированы к каждому конкретному СУ. В случае светодиодных линеек существуют дополнительные условия, усложняющие использование данного метода, а значит, и анализ кривых нагрева или охлаждения. Усреднение идет по всем СИД линейки в условиях трехмерного растекания теплоты по пластине теплоотвода, т. е. существует разница в нагреве СИД на концах линейки и в ее середине. Это может повлиять на вид зависимости усредненной температуры СИД линейки от времени и, следовательно, ограничивать возможности метода для получения структуры тепловых сопротивлений элементов СИД и внешнего теплоотвода.

Целью исследований являлись анализ тепловых свойств мощных светодиодных линеек и установление особенностей применения для этого метода переходных электрических процессов. Для апробации метода выбраны линейки светодиодов фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd [14], представляющие собой линейный ряд СИД на массивной алюминиевой пластинке, являющейся теплоотводом. Линейки такого же типа выпускают и другие производители [15–18].

Результаты исследования и их обсуждение

Измерение тепловых параметров линеек синих светодиодов фирмы Paragon мощностью до 8 Вт как при наличии, так и при отсутствии дополнительного внешнего теплоотвода (ребристого алюминиевого радиатора) проводили на автоматизированной установке [19], включающей мультиметр HP34401A и источник напряжения E3643A (производство Agilent Technologies). Использовались переходные электрические процессы при подаче прямоугольного импульса тока длительностью до 150–200 с, соответствующей выходу линеек на тепловой режим, близкий к стационарному. Температуру активной области СИД линеек определяли по изменению с течением времени прямого напряжения смещения на малом токе с последующим пересчетом в температуру с использованием предварительно определенного температурного коэффициента напряжения. Диапазон изменения импульсных токов нагрузки, вызывающих нагрев линейки СИД, составлял 80–600 мА. Методика измерений и их обработки описана в американском военном стандарте JESD 51-1, Integrated Circuit Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) [20].

Кривые остывания активной области линеек синих СИД после выключения электрической нагрузки представлены на рис. 1.

На температурных зависимостях кривых охлаждения от времени можно выделить три интервала с разными скоростями изменения температуры: $t \leq 10^{-2}$ с, $10^{-2} < t \leq 5 \cdot 10^{-1}$ с, $t > 5 \cdot 10^{-1}$ с для СИД без радиатора (рис. 1a) и $t \leq 1$ с, $1 < t \leq 30$ с, $t > 30$ с для СИД с радиатором (рис. 1b). Последние интервалы соответствуют выходу линейки на стационарный режим.

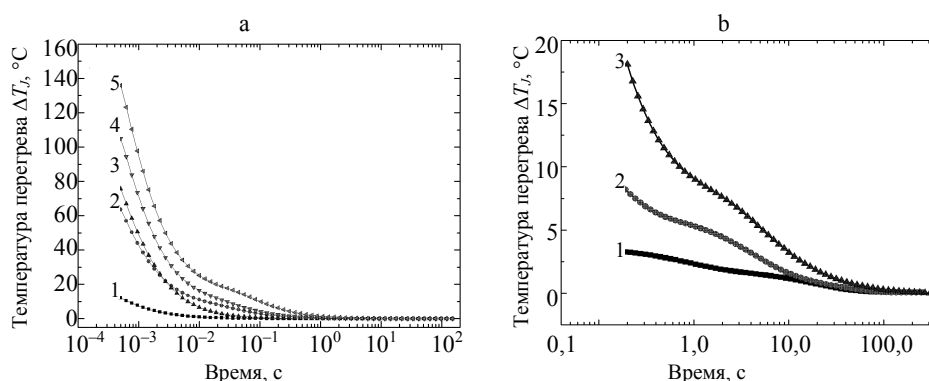


Рис. 1. Кривые охлаждения линеек синих СИД:

а – без радиатора для токов накачки: 1 – 80 мА; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600 мА;
 б – то же с радиатором для токов: 1 – 200 мА; 2 – 400; 3 – 600 мА

Fig. 1. Cooling curves of the blue LED lines:

а – without a heatsink for pumping currents: 1 – 80 мА; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600 мА;
 б – same with a heatsink for currents: 1 – 200 мА; 2 – 400; 3 – 600 мА

Зависимости температуры перегрева активных областей линеек синих светодиодов от величины тока инжекции после выхода на стационарный режим представлены на рис. 2. Видно, что перегрев активной области светодиодов линеек без радиатора при токе накачки 600 мА достигал 138 °С (рис. 2, кривая 1), т. е. значений, превышающих предельную температуру для данных светодиодов.

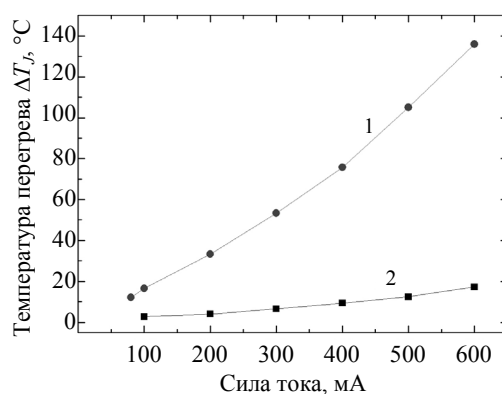


Рис. 2. Зависимость температуры перегрева активных областей линеек синих СИД без радиатора (1) и с радиатором (2) от величины тока инжекции

Fig. 2. The blue LED lines active areas overheating temperature dependence on injection current value without a heatsink (1) and with a heatsink (2)

Применение ребристого алюминиевого радиатора позволило существенно снизить температуру перегрева активной области светодиодов (рис. 2, кривая 2). Необходимо также отметить, что на эффективность внешнего теплоотвода заметное влияние оказывают пространственное по-

ложение радиатора и ориентация его ребер относительно восходящего воздушного потока при естественной конвекции.

Для получения распределения температур по линейке проведено компьютерное моделирование нагрева линейки с использованием пакета ANSYS. Учитывали только теплопроводность воздуха, конвективный теплообмен не учитывали. Результаты представлены на рис. 3.

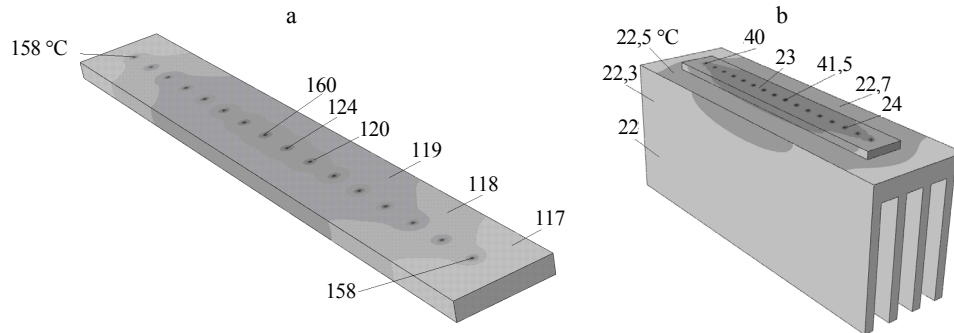


Рис. 3. Распределение температуры нагрева линеек синих СИД без радиатора (а) и с радиатором (б) при токе инжекции 600 мА через 150 с (после выхода на стационарный режим). Температура окружающей среды принята 20 °С

Fig. 3. The blue LED lines heating temperature distribution without a heatsink (a) and with a heatsink (b) with injection current 600 mA after 150 sec (after reaching the steady-state conditions). Environment temperature assumed 20 °C

Из картины тепловых полей линейки при отсутствии радиатора (рис. 3а) видно, что СИД линейки находятся в неравных тепловых условиях. В частности, нагрев СИД в центре линейки составляет 160 °С, крайних СИД 158 °С. Температура алюминиевой пластинки, на которой находятся СИД в центре линейки (непосредственно вблизи кристаллов СИД), составляет 124 °С и к краям снижается до 117 °С. Градиент температур в направлении, перпендикулярном пластинке, существенно ниже. При наличии массивного ребристого радиатора температура СИД (рис. 3б) снижается до 41,5 °С. Разброс температур становится меньше и составляет приблизительно 1 °С в плоскости линейки и 2 °С вдоль ребер радиатора. Необходимо отметить, что рассматриваемые градиенты температур линеек могут повышаться при учете конвективного теплообмена (зависящего от положения линеек), а также на ранних стадиях нагрева или охлаждения.

Таким образом, светодиодные линейки данного типа характеризуются достаточно неоднородным распределением температур, что необходимо учитывать при анализе тепловых свойств и определении тепловых параметров, например теплового сопротивления и его структуры. В первом приближении распространение теплоты в линейке можно представить как совокупность параллельных взаимодействующих тепловых потоков с различной временной кинетикой. Такое усреднение накладывает ограничения

на точность и достоверность определения тепловых сопротивлений элементов структуры отдельных СИД и линейки в целом.

В [21] показано, что для переходных процессов в тепловых цепях после выключения электрической мощности кривая остывания активной области светодиода может быть выражена суммой экспоненциальных членов, полученной для случая последовательно-параллельной схемы включения тепловых сопротивлений R_{th} и теплоемкостей C_{th} , т. е. в рамках схемы Фостера:

$$\Delta T(t) = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th,i}}\right) = P_T \sum_{i=1}^n R_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th,i}}\right), \quad (1)$$

где $\tau_{th,i}$ – тепловые постоянные времени элементов структуры СИД и теплоотвода; ΔT_i – изменение температуры на этих элементах; $R_{th,i}$ – тепловое сопротивление элементов; P_T – тепловая мощность.

В случае линейки $\tau_{th,i}$, ΔT_i , $R_{th,i}$ являются усредненными по всем СИД величинам.

Необходимо отметить, что из-за усреднения и разброса температур активных областей СИД линейки примерно на 2 К (рис. 3а) разброс тепловых сопротивлений составит ~0,3 К/Вт, в то время как тепловое сопротивление, например GaN, слоев синих СИД находится на уровне <0,1 К/Вт, а чипа СИД (до слоя посадки) не превышает ~1,0 К/Вт [11]. Поэтому разрешение элементов структуры тепловых сопротивлений чипов СИД рассматриваемых линеек является, по мнению авторов, проблематичным.

Кривые охлаждения линеек без радиатора, характеризующиеся большим интервалом изменения температур, в рамках формулы (1) с точностью 1–5 % были подогнаны суммой двух экспоненциальных слагаемых, соответствующих двум ступеням $R_{th}C_{th}$ цепи, которые с высокой вероятностью могут быть приписаны интегральному тепловому сопротивлению «активная область СИД – корпус» и «корпус – окружающая среда». Это согласуется с наличием первых двух интервалов с существенно различающимися скоростями изменения температуры (рис. 1а) и тем обстоятельством, что характерной особенностью данных линеек является наличие массивной алюминиевой подложки. Для учета последующих цепочек должно быть доказано, что их появление – это не следствие различия кинетик нагрева различных СИД линейки, так как в рассматриваемом случае их учет приводил к трудно поддающимся интерпретации результатам. Для подтверждения данного подхода использовали другой метод анализа, предложенный в [10, 11], основанный на построении временного спектра тепловых сопротивлений (рис. 4), который можно проанализировать на основе формулы

$$R^*(t) = \sum_{i=1}^n R_i \frac{t}{\tau_{th,i}} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_{th,i}}\right). \quad (2)$$

Для данного спектра в случае значительно различающихся значений $\tau_{th,i}$ для соседних RC цепочек можно считать $\tau_{th,i} \approx t$ в максимумах $R^*(t)$. На рис. 4 явно выделяются значительно различающиеся по временной шкале два бесструктурных пика с характерными временами порядка ~ 1 мс и ~ 100 мс, которые, как упоминалось ранее, можно связать с тепловыми сопротивлениями «активная область СИД – корпус» и «корпус – окружающая среда».

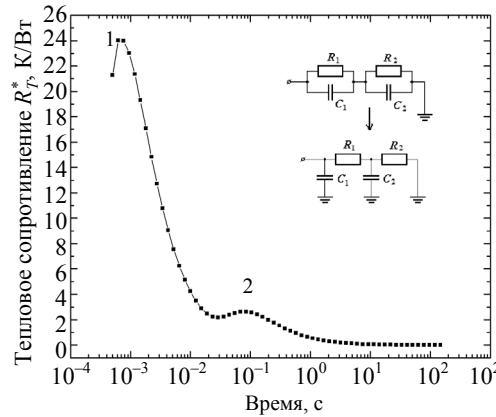


Рис. 4. Временной спектр тепловых сопротивлений линейки синих СИД без радиатора, построенный согласно [10, 11]

Fig. 4. Heat resistances time spectrum of the blue LED lines without a heatsink built according [10, 11]

Таким образом, достаточно хорошие результаты при анализе кривых охлаждения рассматриваемых светодиодных линеек дает подгонка в рамках формулы

$$\Delta T(t) = \Delta T_{JC} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th,JC}}\right) + \Delta T_{CA} \exp\left[-\frac{t}{\tau_{th,CA}}\right], \quad (3)$$

где $\tau_{th,JC} \approx R_{th,JC}C_{th,JC}$ и $\tau_{th,CA} \approx R_{th,CA}C_{th,CA}$ – тепловые постоянные времени «активная область СИД – корпус» и «корпус – окружающая среда»; ΔT_{JC} , ΔT_{CA} – изменения температуры на тепловых сопротивлениях $R_{th,JC}$ и $R_{th,CA}$ соответственно.

Первая ступень эквивалентной $R_{th}C_{th}$ цепи связана с чипами светодиодов и слоями посадки на алюминиевую подложку, вторая ступень обусловлена подложкой, радиатором (при его наличии) и конвекционными потерями теплоты. Необходимо также отметить, что в этом случае из-за значительно отличающихся тепловых постоянных времени параметры в схемах Фостера и Кауера совпадают (вставка на рис. 4). Поскольку теплоемкости на последующей ступени значительно больше, чем на предыдущей, то в схеме Фостера они могут быть рассмотрены как короткозамкнутые на землю, и в данном случае нет необходимости в пересчете при переходе от одной схемы к другой.

Зависимость четырех подгоночных параметров в формуле (2) от величины тока накачки для линеек синих светодиодов без внешнего теплоотвода представлена на рис. 5.

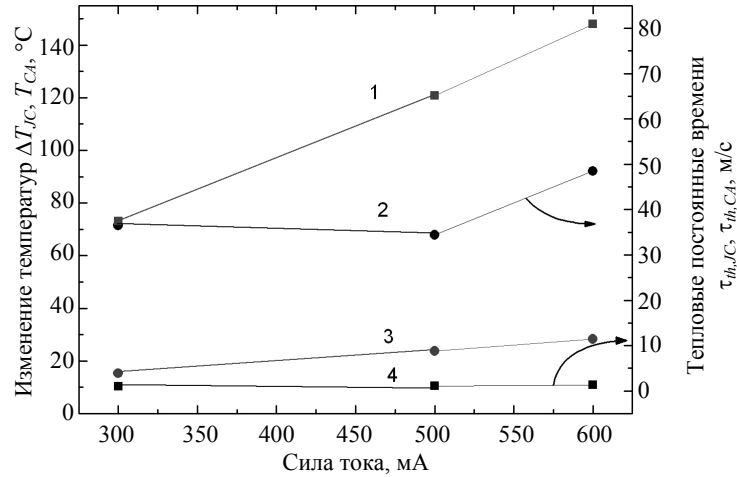


Рис. 5. Зависимость подгоночных параметров ΔT_{JC} (1), ΔT_{CA} (3), $\tau_{th,JC}$ (4), $\tau_{th,CA}$ (2) от величины тока инжекции для линеек синих СИД без радиатора

Fig. 5. Adjustable parameters ΔT_{JC} (1), ΔT_{CA} (3), $\tau_{th,JC}$ (4), $\tau_{th,CA}$ (2) dependence on the value of injection current for the blue LED lines without a heatsink

Из рис. 5 видно, что тепловые постоянные времени $\tau_{th,JC}$ и $\tau_{th,CA}$ лежат в том же миллисекундном интервале, что и на рис. 4, различаются более чем на порядок и слабо зависят от тока инжекции. Для линеек светодиодов получены следующие значения тепловых постоянных времени:

$$\tau_{th,JC} = 1,14 \pm 0,12 \text{ мс}; \quad \tau_{th,CA} = 39,8 \pm 5,8 \text{ мс}.$$

Зная изменения температур ΔT_{JC} и ΔT_{CA} и мощность электрического тока P , проходящего через линейку, можно определить соответствующие тепловые сопротивления $R_{th,JC} = \Delta T_{JC}/P$ и $R_{th,CA} = \Delta T_{CA}/P$ и теплоемкости $C_{th,JC} = \tau_{th,JC}/R_{th,JC}$ и $C_{th,CA} = \tau_{th,CA}/R_{th,CA}$.

В результате получены следующие значения тепловых сопротивлений и теплоемкостей для линеек синих светодиодов:

$$R_{th,JC} = 24,7 \text{ К/Вт}; \quad R_{th,CA} = 4,7 \text{ К/Вт};$$

$$C_{th,JC} = 46,0 \text{ мкДж/К}; \quad C_{th,CA} = 8,5 \text{ мДж/К}.$$

Необходимо отметить, что исходя из плотности $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ алюминия, его удельной теплоемкости $C_{уд} = 923 \text{ Дж/(кг·К)}$ и коэффициента теплопроводности $K = 218 \text{ Вт/(м·К)}$ [22, 23], а также толщины алюминиевой подложки $d = 2 \text{ мм}$, можно оценить (в предположении одномерного распространения теплоты) соответствующую ей постоянную времени, тепловое сопротивление и теплоемкость по формулам:

$$\tau = \frac{\rho C_{\text{уд}} d^2}{K}; \quad R = \frac{d}{KS}; \quad C = \rho C_{\text{уд}} S d. \quad (4)$$

Несмотря на то что расчетное значение постоянной времени алюминиевой подложки $\tau = 40$ мс было близким к полученным выше значениям $\tau_{th,CA}$, рассчитанное тепловое сопротивление оказалось малым, а теплоемкость большой по сравнению со значениями $R_{th,CA}$ и $C_{th,CA}$, полученными экспериментально. Это свидетельствует о том, что величины $R_{th,CA}$ и $C_{th,CA}$ определяются характером растекания теплоты в подложке (зависимостью от площади алюминиевой подложки S), и снижение $R_{th,CA}$ наряду с применением внешнего теплоотвода требует также улучшения теплового дизайна.

ВЫВОДЫ

1. Методом переходных электрических процессов исследованы тепловые свойства мощных алюминиевых светодиодных линеек (на примере линеек фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd). Определено изменение температуры активной области светодиодов в линейках при разных значениях тока инжекции и различных условиях теплоотвода.

2. Проведено компьютерное моделирование нагрева линеек с использованием пакета ANSYS. Определена степень неоднородности распределения температуры вдоль линейки, из которой следует невозможность выделения тепловых свойств элементов структуры чипов линейки на основе усредненных по всем светодиодам временных зависимостей температуры.

3. Показано, что применяя метод временных зависимостей температуры светодиодов и представление их двумя эквивалентными RC цепочками, соответствующими тепловым путям «активная область светодиодов – алюминиевая подложка» и «алюминиевая подложка – окружающая среда», можно получить с достаточно высокой точностью (<5 %) основные тепловые параметры линеек светодиодов. Так, используя подгонку экспериментальных данных в рамках данного представления, определены соответствующие тепловые постоянные времени, тепловые сопротивления и теплоемкости линеек синих светодиодов фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ характеристик светодиодной продукции из базы данных LED Lighting Facts Департамента энергетики США (LED Lighting Facts 2014) // Современная светотехника. 2014. № 6. С. 7–20.
2. Внутреннее освещение. Аналитический отчет программы LED Lighting Facts Департамента энергетики США (LED Lighting Facts 2014) // Современная светотехника. 2015. № 2. С. 3–9.
3. Полищук, А. Г. Дegradaция полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Г. Полищук, А. Н. Туркин // Компоненты и технологии. 2008. № 2. С. 25–28.

4. Шуберт, Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт; пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. М.: Физматлит, 2008. 495 с.
5. Székely, V. Fine Structure of Heat Flow Path in Semiconductor Devices: a Measurement and Identification Method / V. Székely, Tran Van Bien // Solid-State Electronics. 1988. Vol. 31, No 9. P. 1363–1368.
6. Székely, V. A New Evaluation Method of Thermal Transient Measurement Results / V. Székely // Microelectronics Journal. 1997. Vol. 28, No 3. P. 277–292.
7. Székely, V. Increasing the Accuracy of Thermal Transient Measurements / V. Székely, M. Rencz // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2002. Vol. 25, No 4. P. 539–546.
8. Masana, F. N. Thermal Impedance Measurements under Non-Equilibrium Conditions. How to Extend its Validity / F. N. Masana // Microelectronics Reliability. 2008. Vol. 48, No 4. P. 563–568.
9. Schweitzer, D. Transient Measurement of the Junction-to-Case Thermal Resistance Using Structure Functions: Chances and Limits / D. Schweitzer, H. Pape, L. Chen // 24th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, SEMI-THERM 2008. San Jose, 2008. P. 193–199.
10. Development of a Standard for Transient Measurement of Junction-to-Case Thermal Resistance / H. Pape [et al.] // 12th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2011. Linz, 2011. P. 1/8–8/8.
11. Bumai, Yu. A. Measurement and Analysis of Thermal Parameters and Efficiency of Laser Heterostructures and Light-Emitting Diodes / Yu. A. Bumai, A. S. Vaskou, V. K. Kononenko // Metrology and Measurement Systems. 2010. Vol. 17, No 1. P. 39–46.
12. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A. L. Zakgeim [et al.] // EuroSimE 2013: 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. Wroclaw, Poland, 2013. Article number 6529922.
13. Smith, B. Utility of Transient Testing to Characterize Thermal Interface Materials / B. Smith, T. Brunschweiler, B. Michel // THERMINIC 2007: 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. Budapest, 2007. P. 6–11.
14. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники: в 2-х т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. Л.: Энергоиздат, 1981. Т. 1. 536 с.
15. Официальный сайт фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technologies Co. [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: http://paragonled.com/eng/series_1.html. Дата доступа: 09.10.2013.
16. Алюминиевые светодиодные линейки со светодиодами фирмы Cree [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: http://leoled.ru/otkrytaya_svetodiodnaya_lenta. Дата доступа: 16.09.2015.
17. Алюминиевые светодиодные линейки фирмы Philips Lumileds [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.lightingmedia.ru/news/>. Дата доступа: 16.09.2015.
18. Алюминиевые светодиодные линейки фирмы Seoul Semiconductor [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.sea-ge.com/svetodiodnaya-produktsiya/svetodiodnye-lineyki-i-moduli>. Дата доступа: 16.09.2015.
19. Алюминиевые светодиодные линейки фирмы Lumileds Lighting [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.lumileds.com/products/matrix-platform/luxeon-xf-35351>. Дата доступа: 16.09.2015.
20. Манего, С. А. Анализ переходных тепловых процессов в светодиодах / С. А. Манего, С. И. Лишик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 15 апр. 2010 г. / под ред. Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюка, А. С. Калиниченко. Минск: БНТУ, 2010. Т. 3. С. 349.

21. JEDEC/JESD 51-1: Integrated Circuit Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device), Dec. 1995 [Electronic resource] 2015. Mode of Access: http://www.thermengr.net/html/jedec_stds.html. Дата доступа: 10.10.2013.
22. Masana, F. N. A New Approach to the Dynamic Thermal Modelling of Semiconductor Packages / F. N. Masana // *Microelectronics Reliability*. 2001. Vol. 41, No 6. P. 901–912.
23. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 3. 728 с.

Поступила 01.10.2015 Подписана в печать 30.11.2015 Опубликована онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Analysis of the Characteristics of LED Products from the Database of LED Lighting Facts Department of Energy (LED Lighting Facts 2014). *Sovremennaya Svetotekhnika* [Modern Lighting Technology], 2014, 6, 7–20 (in Russian).
2. Interior Lighting. Analytical Report on the LED Lighting Facts Program of the U.S. Department of Energy (LED Lighting Facts 2014). *Sovremennaya Svetotekhnika* [Modern Lighting Technology], 2015, 2, 3–9 (in Russian).
3. Polishchuk A. G., & Turkin A. N. (2008) Degradation of Semiconductor LEDs Based on Gallium Nitride and its Solid Solutions. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies], 2008, 2, 25–28 (in Russian).
4. Schubert F. (2003) *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press. 313 p. (Russ. ed.: Schubert F. (2008) *Svetodiody*. Moscow, Fizmatlit. 495 p.)
5. Székely V., & Tran Van Bien. (1988) Fine Structure of Heat Flow Path in Semiconductor Devices: a Measurement and Identification Method. *Solid-State Electronics*, 31 (9), 1363–1368. DOI: 10.1016/0038-1101(88)90099-8.
6. Székely V. (1997) A New Evaluation Method of Thermal Transient Measurement Results. *Microelectronics Journal*, 28 (3), 277–292.
7. Székely V., & Rencz M. (2002) Increasing the Accuracy of Thermal Transient Measurements. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25 (4), 539–546. DOI: 10.1109/TCAPT.2002.808002.
8. Masana F. N. (2008) Thermal Impedance Measurements under Non-Equilibrium Conditions. How to Extend its Validity. *Microelectronics Reliability*, 48 (4), 563–568. DOI: 10.1016/j.microrel.2007.11.005.
9. Schweitzer D., Pape H., & Chen L. (2008) Transient Measurement of the Junction-to-Case Thermal Resistance Using Structure Functions: Chances and Limits. *24th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, SEMI-THERM 2008*. San Jose, 193–199. DOI: 10.1109/STHERM.2008.4509389.
10. Pape H., Schweitzer D., Chen L., Kutscherauer R., & Walder M. (2011) Development of a Standard for Transient Measurement of Junction-to-Case Thermal Resistance. *12th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2011*. Linz, 1/8–8/8. DOI: 10.1109/ESIME.2011.5765862.
11. Bumai Yu. A., Vaskou A. S., & Kononenko V. K. (2010) Measurement and Analysis of Thermal Parameters and Efficiency of Laser Heterostructures and Light-Emitting Diodes. *Metrology and Measurement Systems*, 17 (1), 39–46. DOI: 10.2478/v10178-010-0004-x.
12. Zakgeim A. L., Chernyakov A. E., Vaskou A. S., Kononenko V. K., & Niss V. S. (2013) Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types. *EuroSimE 2013: 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*. Wroclaw, Poland, Article number 6529922. DOI: 10.1109/EuroSimE.2013.6529922.
13. Smith B., Brunswiler T., & Michel B. (2007) Utility of Transient Testing to Characterize Thermal Interface Materials. *THERMINIC 2007: 14th International Conference on Thermal,*

- Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*. Budapest, 6–11. DOI: 10.1109/THERMINIC.2007.4451738.
14. Neiman L. R., & Demirchyan K. S. (1981) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 1*. Leningrad, Energoizdat. 536 p. (in Russian).
 15. *The Official Website of the Company Paragon Semiconductor Lighting Technologies Co*. Available at: http://paragonled.com/eng/series_1.html. (Accessed 9 October 2013), (in Russian).
 16. *Aluminum LED Bar with LEDs by Cree*. Available at: http://leoled.ru/otkrytaya_svetodiodnaya_lenta. (Accessed 16 September 2015) (in Russian).
 17. *Aluminum LED Line Philips Lumileds*. Available at: <http://www.lightingmedia.ru/news/>. (Accessed: 16 September 2015) (in Russian).
 18. *Aluminum LED Line Company Seoul Semiconductor*. Available at: <http://www.sea-ge.com/svetodiodnaya-produktsiya/svetodiodnye-lineyki-i-moduli>. (Accessed: 16 September 2015) (in Russian).
 19. *Aluminum LED Line Lumileds Lighting Company*. Available at: <http://www.lumileds.com/products/matrix-platform/luxeon-xf-35351>. (Accessed: 16 September 2015) (in Russian).
 20. Manego S. A., & Lishik S. I. (2010) Analysis of Transient Thermal Processes in Light-Emitting Diodes. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Vosmoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. T. 3* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 8th International Science and Technical Conference. Vol. 3]. Minsk: BNTU, 349 (in Russian).
 21. JEDEC/JESD 51-1, 'Integrated Circuit Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)', Dec. 1995. Available at: http://www.thermengr.net/html/jedec_std.html. (Accessed: 10 October 2013).
 22. Masana F. N. (2001) A New Approach to the Dynamic Thermal Modelling of Semiconductor Packages. *Microelectronics Reliability*, 41 (6), 901–912. DOI: 10.1016/S0026-2714(01)00013-0.
 23. Koritskiy Yu. V., Pasinkov V. V., & Tareev B. M. (1988) *Handbook on Electrotechnical Materials. Vol. 3*. Leningrad, Energoatomizdat. 728 p. (in Russian).

Received: 1 October 2015 Accepted: 30 November 2015 Published online: 16 December 2015

УДК 621.352

Оценка значимости влияния термодинамических факторов на эффективность работы твердооксидных топливных элементов

В. А. Седнин¹⁾, А. А. Чичко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Технологии прямого преобразования энергии топлива в электрическую энергию являются перспективным направлением в энергетике. В последние десятилетия в ряде стран созданы промышленные образцы электростанций на топливных элементах (ячейках), а сами топливные элементы стали коммерческим изделием на мировом энергетическом рынке. Высокий электрический КПД топливных ячеек позволяет говорить о дальнейшем их распространении в составе гибридных установок совместно с газо- и паротурбинными установками, что дает возможность достигать электрического КПД более 70 %. Тем не менее исследования в области повышения эффективности и надежности топливных элементов продолжаются. В частности, научный интерес представляет изучение влияния на эффективность работы твердооксидных топливных элементов термодинамических параметров реакции окисления, состава топлива и продуктов реакции окисления. В статье выполнен краткий анализ влияния вида топлива на эффективность работы твердооксидных топливных элементов. На основе имеющихся в открытой печати экспериментальных данных и данных численного моделирования представлены результаты статистического анализа влияния термодинамических параметров твердооксидного топливного элемента на эффективность его функционирования, а также факторов взаимодействия этих параметров и состава газов на входе в элемент и выходе из него. Приведены диаграммы, которые отражают степень влияния указанных параметров на эффективность работы твердооксидных топливных элементов, определены степени значимости вышеперечисленных факторов. Статистический анализ влияния термодинамических, расходных и концентрационных параметров процесса функционирования твердооксидных топливных элементов показал, что наиболее существенное влияние на эффективность работы элемента в исследованной области оказывают факторы взаимодействия (температура – расход и давление – расход) и концентрации азота N_2 и кислорода O_2 . Именно эти параметры должны в первую очередь учитываться в математических моделях, разрабатываемых для оптимизации режимов работы твердооксидных топливных элементов.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент, термодинамические параметры, концентрация, статистический анализ

Для цитирования: Седнин, В. А. Оценка значимости влияния термодинамических факторов на эффективность работы твердооксидных топливных элементов / В. А. Седнин, А. А. Чичко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 87–97

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Effect Significance Assessment of the Thermodynamical Factors on the Solid Oxide Fuel Cell Operation

V. A. Sednin¹⁾, A. A. Chichko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Technologies of direct conversion of the fuel energy into electrical power are an upcoming trend in power economy. Over the last decades a number of countries have created industrial prototypes of power plants on fuel elements (cells), while fuel cells themselves became a commercial product on the world energy market. High electrical efficiency of the fuel cells allows predicting their further spread as part of hybrid installations jointly with gas and steam turbines which specifically enables achieving the electrical efficiency greater than 70 %. Nevertheless, investigations in the area of increasing efficiency and reliability of the fuel cells continue. Inter alia, research into the effects of oxidizing reaction thermodynamic parameters, fuel composition and oxidation reaction products on effectiveness of the solid oxide fuel cells (SOFC) is of specific scientific interest. The article presents a concise analysis of the fuel type effects on the SOFC efficiency. Based on the open publications experimental data and the data of numerical model studies, the authors adduce results of the statistical analysis of the SOFC thermodynamic parameters effect on the effectiveness of its functioning as well as of the reciprocative factors of these parameters and gas composition at the inlet and at the outlet of the cell. The presented diagrams reflect dimension of the indicated parameters on the SOFC operation effectiveness. The significance levels of the above listed factors are ascertained. Statistical analysis of the effects of the SOFC functioning process thermodynamical, consumption and concentration parameters demonstrates quintessential influence of the reciprocative factors (temperature – flow-rate and pressure – flow-rate) and the nitrogen N_2 and oxygen O_2 concentrations on the operation efficiency in the researched range of its functioning. These are the parameters to be considered on a first-priority basis while developing mathematical models for optimizing the solid oxide fuel cells operating modes.

Keywords: solid oxide fuel cell, thermodynamic parameters, concentration, statistical analysis

For citation: Sednin V. A., & Chichko A. A. Effect Significance Assessment of the Thermodynamical Factors on the Solid Oxide Fuel Cell Operation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 87–97 (in Russian)

В наше время пристальное внимание уделяется развитию энергетических установок с топливными элементами (ячейками), работающими на различных видах газообразного и жидкого топлива (водород, природный газ, биогаз, биотопливо и пр.) [1–10]. При применении твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), как правило, рассматриваются гибридные технологические схемы энергетических установок, в состав которых, кроме ТОТЭ, входят газовые и паровые турбины.

Несмотря на то что каждая гибридная установка имеет свою собственную структуру, все они обладают некоторыми общими характеристиками:

- при работе на топливе, отличающемся от водорода H_2 или монооксида углерода CO , в состав установки должна входить подсистема риформинга (процесс преобразования входного топлива в H_2 или CO или их смесь). Следует учитывать, что химические процессы в риформинге эндотермичны;
- в случае риформинга исходного топлива при работе ТОТЭ отходящие с анода газы включают в себя остатки нериформированных газов, которые далее могут дожигаться в камерах сгорания в среде продуктов сгорания

с последующим использованием их энергетического потенциала в газо- и паротурбинных установках [11].

Эксергетический анализ систем, который позволяет исследовать влияние плотности тока и температуры на характеристики систем, работающих на водороде и метане, дан в [12]. В [13] сравниваются системы, работающие на водороде и этаноле. Некоторые характеристики оказались выше при работе на водороде, другие – при работе на этаноле, но при одинаковой схеме общая эффективность больше при работе на водороде.

Характеристики гибридной системы ТОТЭ с газовой турбиной, которая создана для работы на метане, но в ходе исследования качества топлива в ней использовали другие виды топлива, представлены [14]. Цель работы заключалась в исследовании влияния замены топлива в гибридной установке, которую спроектировали под определенное топливо – метан. Показано, что при использовании водорода вместо метана чистая выходная мощность гибридной системы снижается до 70 % по сравнению с работой на метане (эффективность которой превышает 75 %).

Эффективность гибридной установки ТОТЭ и газовой турбины на различных видах топлива (метан, этанол, метанол, водород и аммиак) проанализирована [8]. Эксергетический анализ проведен как для всей системы в целом, так и для отдельных элементов системы, таких как теплообменники, газовые турбины, горелки, компрессоры и топливные элементы. Показано, что в данной схеме (с подачей водорода) система имеет наименьшую энергетическую эффективность (70 %) по сравнению с теми же схемами с метаном (78 %), который является наиболее эффективным видом топлива для систем.

Обобщая, можно констатировать, что все исследованные системы, работающие на водороде, имеют самую низкую эффективность в сравнении с системами, работающими на других видах топлива. Объясняется это тем, что отсутствие предварительного риформинга топлива требует компенсации экзотермической теплоты дополнительным объемом первичного топлива. Тем не менее, учитывая хорошие перспективы водорода в качестве будущего универсального топлива [15], представляется важным оптимизация систем ТОТЭ, работающих на данном газе. Эти системы имеют свои особенности (отсутствие какого-либо предварительного риформинга (как упоминалось выше) и также состав остаточных анодных газов, являющихся комбинацией непосредственно водорода и водяного пара, из которого можно с легкостью переработать непрореагировавший водород [16]).

Ранее нами [17] исследовалась схема гибридной системы, работающей на биогазе с риформингом. Анализ показал, что данная система имеет перспективы применения на биогазовых комплексах, так как по электрическому КПД она превосходит когенерационные установки на базе поршневых и газотурбинных двигателей, а по коэффициенту использования топлива не уступает им. Учитывая, что на биогазовых комплексах, как правило, тепловая нагрузка ограничена собственными нуждами, перераспределение мощности в сторону выработки электроэнергии имеет дополнительные преимущества. Все сказанное подтверждает актуальность исследований в области оптимизации гибридных установок на базе ТОТЭ.

Одна из важнейших задач при оптимизации схем с топливными элементами в энергетике – выявление взаимосвязей между термодинамическими параметрами топливных элементов и характеристиками газов, участвующих в функционировании этих элементов. Знание влияния переменных (температуры, давления, состава газов) дает возможность разработчикам топливных элементов оптимизировать их конструкцию, состоящую из модульных блоков, а это в свою очередь позволяет инженерам-технологам максимально увеличить производительность системы. Методология оценки эффективности функционирования топливного элемента строится на основе определения сначала его «идеальной» производительности, а затем введения поправок, связанных с реальными условиями промышленной эксплуатации.

Моделирование гибридной системы ТОТЭ с газовой турбиной в Aspen Plus platform представлено в [18]. В ходе численного исследования рассмотрены варианты работы гибридной системы на сингазе и метане, с рециркуляцией газов с анода и с дополнительным источником воды. Учитывались следующие параметры: температура, давление, расход (массовый, объемный и молярный), а также состав газов, которые были приняты согласно экспериментальным данным [19, 20]. Характеристики оборудования, такие как мощность, работа, эффективность, теплота, вычисляли в ходе численного эксперимента. В табл. 1 представлены пределы изменения характеристик элементов и системы в целом гибридной схемы, полученные в ходе исследования.

Таблица 1

**Обобщенные характеристики параметров гибридной системы ТОТЭ
с газовой турбиной**

Summarized characteristics of the SOFC hybrid system parameters with a gas turbine

Элемент	Мощность, кВт	Удельная работа, кДж/кг воздуха	КПД, %
Компрессор для воздуха	16,700–26,500	130,40	85,0
Компрессор для топлива	1,000	5,00–8,10	85,0
Насос	0,002	0,01	85,0
ТОТЭ	13,700–129,900	103,90–829,10	19,3–58,2
Турбина	46,500–80,100	362,10–394,50	85,0
Общее	42,900–166,300	327,80–1059,40	59,0–75,0

Анализ гибридных схем показал, что для обеспечения риформинга метана можно использовать как газы, выходящие из анода, так и дополнительный источник воды. Характеристики схем (с/без рециркуляции) сильно отличаются друг от друга. Несмотря на то что эффективность и мощность двух систем очень близки, работа цикла с рециркуляцией газов с анода была намного выше, чем в схеме без нее, что означает меньшие денежные затраты на то, чтобы получить одну и ту же мощность для данной системы. Хотя мощность ТОТЭ с рециркуляцией больше, мощность турбины была больше в системе без рециркуляции. Сравнительные характеристики систем, работающих на сингазе и метане, показали, что мощность, работа и ее эффективность на метане больше. Также были промоделирова-

ны системы с разнообразным видом топлива. Показано, что эффективность систем может варьироваться от 59 до 75 % в зависимости от вида топлива.

Проанализированы статистические взаимосвязи между термодинамическими параметрами гибридной системы с ТОТЭ и газовой турбиной, факторами, учитывающими взаимодействие термодинамических параметров, а также концентрационными характеристиками газов, образующихся в системе. В качестве факторов принимали: термодинамические параметры (температуру t и давление p), расход топлива s , характеристики составов газов на входе и выходе топливного элемента (концентрации H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , N_2 , O_2). Как дополнительные характеристики модели использовали факторы взаимодействия термодинамических и расходных параметров, полученных через их произведение tp , ts , ps .

Так как при обработке данных статистическими методами обычно имеется разброс по значениям коэффициента информативности, что характеризует неустойчивость изучаемых взаимосвязей, то для подтверждения статистических зависимостей требуется увеличение числа наблюдений либо исходных данных. Поскольку в данной работе невозможно было увеличивать число наблюдений, то устойчивость результатов проверяли на увеличении числа данных, внесенных в матрицы, различных схем с топливными элементами.

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики температуры t (y_1) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, наиболее информативной по отношению к температуре является концентрация CH_4 . Невысокой информативностью по отношению к температуре обладает группа, связанная с O_2 .

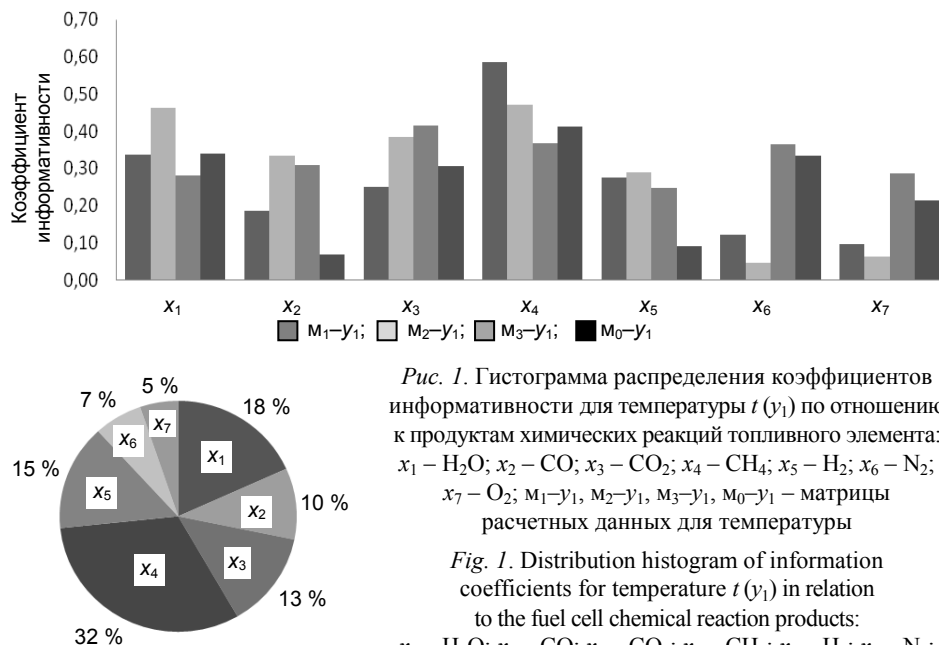


Рис. 1. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для температуры t (y_1) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_1 , M_2-y_1 , M_3-y_1 , M_0-y_1 – матрицы расчетных данных для температуры

Fig. 1. Distribution histogram of information coefficients for temperature t (y_1) in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_1 , M_2-y_1 , M_3-y_1 , M_0-y_1 – calculated data matrices for the temperature

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для давления p (y_2) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента приведена на рис. 2. Для давления практически все термодинамические параметры химических реакций оказались информативными. Но, как видно из рисунка, наиболее информативной является концентрация CO_2 , а наименее – метана CH_4 . Однако для различных матриц для давления, так же как и для температуры, имеется неустойчивость.

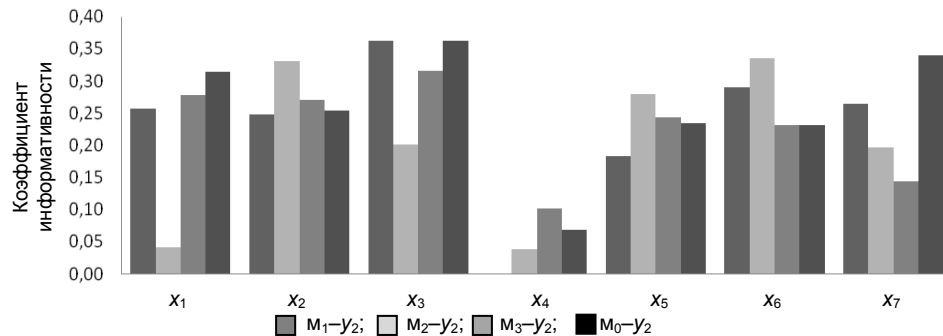


Рис. 2. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики p (y_2) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_2 , M_2-y_2 , M_3-y_2 , M_0-y_2 – матрицы расчетных данных для температуры

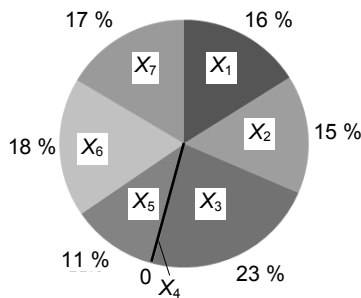


Fig. 2. Distribution histogram of information coefficients for thermodynamical characteristic p (y_2) in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_2 , M_2-y_2 , M_3-y_2 , M_0-y_2 – calculated data matrices for the temperature

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для расхода s (y_3) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента показана на рис. 3. Наиболее информативными по отношению к расходу являются концентрации азота N_2 и кислорода O_2 . Невысокой информативностью по отношению к расходу обладает группа, связанная с продуктом CH_4 . Причем для расхода также практически все термодинамические продукты химических реакций оказались довольно информативными. Как можно видеть из представленных данных, расход наиболее тесно связан с продуктами химических реакций.

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для фактора взаимодействия tp (y_4) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента представлена на рис. 4. Как видно из рисунка, наиболее информативным по отношению к этому параметру является продукт химической реакции CH_4 . Подобный результат наблюдался и для фактора температуры. Как и для температуры, для различных матриц фактор tp по отношению к другим продуктам химических реакций является неустойчивым.

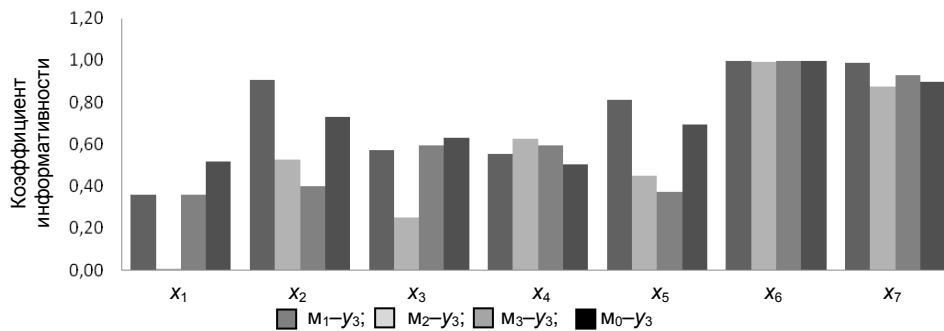


Рис. 3. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики s (y_3) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_3 , M_2-y_3 , M_3-y_3 , M_0-y_3 – матрицы расчетных данных для температуры

Fig. 3. Distribution histogram of information coefficients for thermodynamical characteristic s (y_3) in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_3 , M_2-y_3 , M_3-y_3 , M_0-y_3 – calculated data matrices for the temperature

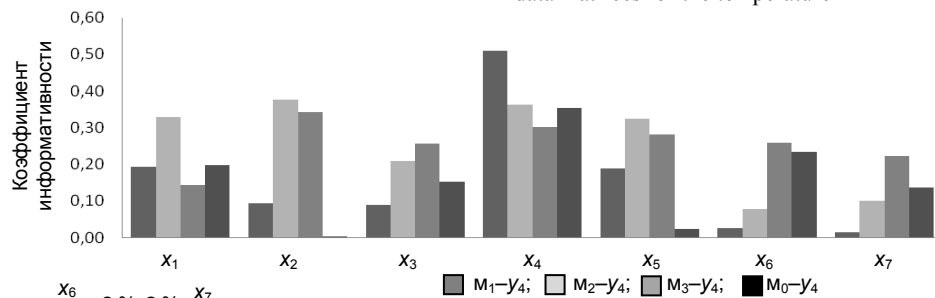
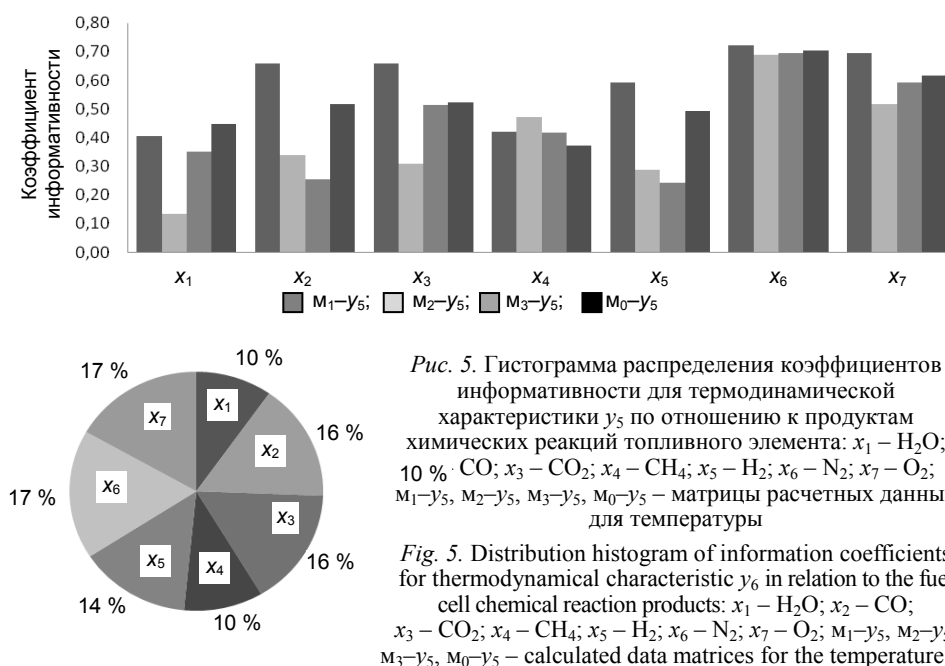


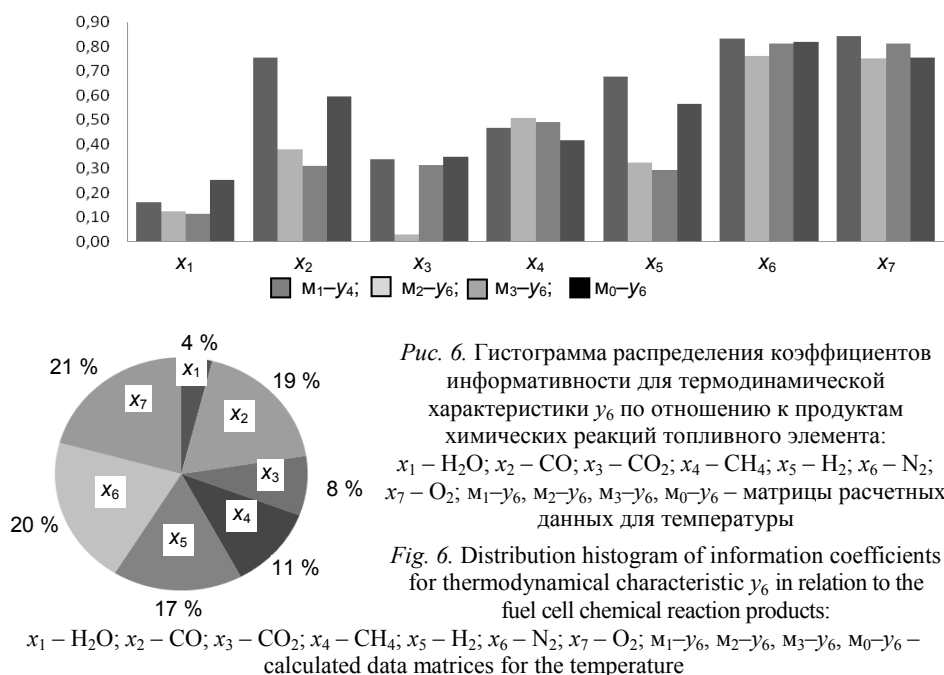
Рис. 4. Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики y_4 по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_4 , M_2-y_4 , M_3-y_4 , M_0-y_4 – матрицы (таблицы) расчетных данных для произведения температуры и давления

Fig. 4. Distribution histogram of information coefficients for thermodynamical characteristic y_4 in relation to the fuel cell chemical reaction products: $x_1 - \text{H}_2\text{O}$; $x_2 - \text{CO}$; $x_3 - \text{CO}_2$; $x_4 - \text{CH}_4$; $x_5 - \text{H}_2$; $x_6 - \text{N}_2$; $x_7 - \text{O}_2$; M_1-y_4 , M_2-y_4 , M_3-y_4 , M_0-y_4 – calculated data matrices (tables) for the product of temperature and pressure

Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики параметра взаимодействия ts (y_5) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента показана на рис. 5. Как видно из рисунка, наиболее информативными по отношению к этому параметру являются продукты химической реакции азота N_2 и кислорода O_2 . Подобный результат наблюдался и для фактора расхода.



Гистограмма распределения коэффициентов информативности для термодинамической характеристики параметра взаимодействия ps (y_6) по отношению к продуктам химических реакций топливного элемента приведена на рис. 6. Как видно из рисунка, наиболее информативными по отношению к этому параметру являются продукты химической реакции азота N_2 и кислорода O_2 . Подобный результат наблюдался и для фактора расхода и температуры с энтропией.



ВЫВОДЫ

1. Совершенствование технологии прямого преобразования с применением твердопливных элементов требует использования гибридных схем энергетических установок с более глубокой утилизацией энергии топлива. При этом могут быть эффективно применены широкая гамма видов топлива и большое разнообразие структурных технологических схем. С научной и практической точек зрения представляет интерес как структурная оптимизация технологических схем, так и оптимизация режимов работы их элементов и в первую очередь самих топливных элементов.

2. Статистический анализ влияния термодинамических, расходных и концентрационных параметров процесса функционирования твердооксидных топливных элементов показал, что наиболее существенное влияние на эффективность работы твердооксидных топливных элементов в исследованной области оказывают факторы взаимодействия (температура – расход и давление – расход) и концентрации азота N_2 и кислорода O_2 . Именно эти факторы должны в первую очередь учитываться при исследовании и оптимизации режимов работы твердооксидных топливных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akkaya, A. V. An Analysis of SOFC/GT CHP System Based on Exergetic Performance Criteria / A. V. Akkaya, B. Sahin, H. H. Erdem // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. Vol. 33, No 10. P. 2566–2577.
2. A Review of Integration Strategies for Solid Oxide Fuel Cells / X. Zhang [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2010. Vol. 195, No 3. P. 685–702.
3. Zabihian, F. A Review on Modeling of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Systems / F. Zabihian, A. Fung // *International Journal of Engineering*. 2009. Vol. 3, No 2. P. 85–119.
4. Huang, B. Solid Oxide Fuel Cell: Perspective of Dynamic Modeling and Control / B. Huang, Y. Qi, M. Murshed // *Journal of Process Control*. 2011. Vol. 21, No 10. P. 1426–1437.
5. Cheddle, D. F. Integration of a Solid Oxide Fuel Cell into a 10 MW Gas Turbine power Plant / D. F. Cheddle // *Energies*. 2010. Vol. 3, No 4. P. 754–769.
6. Thermal-Economic-Environmental Analysis and Multi-Objective Optimization of an Internal-Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System / A. Shirazi [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37, No 24. P. 19111–19124.
7. Mahalingam, A. Clean Electricity Production by Solid Oxide Fuel Cell-Waste Heat Recovery Boiler Arrangement in Conjunction with a Gas Turbine / A. Mahalingam, M. Vaish, S. Agarwal // *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Science and Development, International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering (IPCBE)*. – Singapore: IACSIT Press, 2011. Vol. 4. P. 255–258.
8. Arsalis, A. Thermoeconomic Modeling and Parametric Study of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine-Steam Turbine Power Plants Ranging from 1.5 MWe to 10 MWe / A. Arsalis, M. R. Von Spakovsky, F. Calise // *Journal of Fuel Cell Science and Technology*. 2009. Vol. 6, No 1. P. 0110151–01101512.
9. Patel, H. C. Thermodynamic Analysis of Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Systems Operating with Various Biofuels / H. C. Patel, T. Woudstra1, P. V. Aravind // *Fuel Cells*. 2012. Vol. 12, No 6. P. 1115–1128.
10. Exergy Analysis of an Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System Fed with Ethanol / A. Stamatis [et al.] // *Energies*. 2012. Vol. 5, No 11. P. 4268–4287.
11. Ugartemendia, J. Operating Point Optimization of a Hydrogen Fueled Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Steam Turbine (SOFC-ST) Plant / J. Ugartemendia, J. X. Ostolaza, I. Zubia // *Energies*. – 2013. Vol. 6, No 10. P. 5046–5068.

12. Chan, S. H. Energy and Exergy Analysis of Simple Solid Oxide Fuel-Cell Power Systems / S. H. Chan, C. F. Low, O. L. Ding // *Journal of Power Sources*. 2002. Vol.103, No 2. P. 188–200.
13. Characteristics and Performance of Electrolyte-Supported Solid Oxidefuel Cells under Ethanol and Hydrogen / R. Muccillo [et al.] // *Journal of the Electrochemical Society*. 2008. Vol. 155, No 3. P. B232–B235.
14. Li, Y. Performance Study of a Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid System Designed for Methane Operating with Non-Designed Fuels / Y. Li, Y. Weng // *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196, No 8. P. 3824–3835.
15. Blagojević, V. A. Hydrogen Economy: Modern Concepts, Challenges and Perspectives / V. A. Blagojević [et al.] // *Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives*. – Rijeka, Croatia: InTech, 2012. Chapter: 1. P. 3–28.
16. Holmes, M. Hydrogen Separation Membranes. Technical Report [Electronic resource] // University of North Dakota. 2010. – Mode of access: <http://www.undeerc.org/ncht/>. Date of access: 26.09.2013.
17. Седнин, В. А. Энергетическая система биогазовых комплексов на базе топливных элементов / В. А. Седнин, А. А. Чичко, А. А. Матявин // *Энергия и Менеджмент*. 2014. № 4–5. С. 8–12.
18. Jradi, M. Tri-Generation Systems: Energy Policies, Prime Movers, Cooling Technologies, Configuration Sand Operations Strategies / M. Jradi, S. Riffat // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 32. P. 396–415.
19. Macro Level Modeling of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell / T. Suther [et al.] // *Sustainability*. 2010. Vol. 2, No 11. P. 3549–3560.
20. Effects of Operating and Design Parameters on the Performance of a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine System / T. Suther [et al.] // *International Journal of Energy Research*. 2010. No 35 (7). P. 616–632.

Поступила 31.08.2015 Подписана в печать 21.10.2015 Опубликована онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Akkaya A. V., Sahin B., & Erdem H. H. (2008) An Analysis of SOFC/GT CHP System Based on Exergetic Performance Criteria. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (10), 2566–2577. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.03.013.
2. Zhang X., Chan S. H., Li G., Ho H. K., Li J., & Feng Z. (2010) A Review of Integration Strategies for Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 195 (3), 685–702. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.07.045.
3. Zabihian F. A., & Fung A. (2009) Review on Modeling of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Systems. *International Journal of Engineering*, 3 (2), 85–119.
4. Huang B., Qi Y., & Murshed M. (2011) Solid Oxide Fuel Cell: Perspective of Dynamic Modeling and Control. *Journal of Process Control*, 21 (10), 1426–1437. DOI: 10.1016/j.jprocont.2011.06.017.
5. Cheddie D. F. (2010). Integration of a Solid Oxide Fuel Cell into a 10 MW Gas Turbine Power Plant. *Energies*, 3 (4), 754–769. DOI: 10.3390/en3040754.
6. Shirazi A., Najafi B., Aminyavari M., Rinaldi F. & Taylor R. A. (2012) Thermal-Economic-Environmental Analysis and Multi-Objective Optimization of an Internal-Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (24), 19111–19124. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.143.
7. Mahalingam A., Vaish M., & Agarwal S. (2011) Clean Electricity Production by Solid Oxide Fuel Cell-Waste Heat Recovery Boiler Arrangement in Conjunction with a Gas Turbine. *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Science and Development, International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering (IPCBE)*. Singapore, IACSIT Press, Vol. 4, 255–258.
8. Arsalis A., Von Spakovsky M. R., & Calise F. (2009) Thermo-economic Modeling and Parametric Study of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine-Steam Turbine Power Plants Ranging From 1.5 MWe to 10 MWe. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 6 (1), 0110151–01101512. DOI: 10.1115/1.2971127.

9. Patel H. C., Woudstra T., & Aravind P. V. (2012) Thermodynamic Analysis of Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Systems Operating with Various Biofuels. *Fuel Cells*, 12 (6), 1115–1128. DOI: 10.1002/fuce.201200062.
10. Stamatidis A., Vinni C., Bakalis D., Tzorbatozoglou F., & Tsiakaras P. (2012) Exergy Analysis of an Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System Fed with Ethanol. *Energies*, 5 (11), 4268–4287. DOI: 10.3390/en5114268.
11. Ugartemendia J., Ostolaza J. X., & Zubia I. (2013) Operating Point Optimization of a Hydrogen Fueled Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Steam Turbine (SOFC-ST) Plant. *Energies*, 6 (10), 5046–5068. DOI: 10.3390/en6105046.
12. Chan S. H., Low C. F., & Ding O. L. (2002) Energy and Exergy Analysis of Simple Solid Oxide Fuel-Cell Power Systems. *Journal of Power Sources*, 103 (2), 188–200. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00842-4.
13. Muccillo R., Muccillo E. N. S., Fonseca F., & De Florio D. Z. Characteristics and Performance of Electrolyte-Supported Solid Oxide Fuel Cells under Ethanol and Hydrogen. *Journal of the Electrochemical Society*, 155 (3), B232–B235. DOI: 10.1149/1.2828024.
14. Li Y., & Weng Y. (2011) Performance Study of a Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid System Designed for Methane Operating with Non-Designed Fuels. *Journal of Power Sources*, 196 (8), 3824–3835. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.011.
15. Blagojević V. A., Minić Dejan G., Grbović Novaković J., & Minic Dragica M. (2012) Hydrogen Economy: Modern Concepts, Challenges and Perspectives. *Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives, Chapter: 1*. InTech: Rijeka, Croatia, 3–28. DOI: 10.5772/46098.
16. Holmes M. (2010) Hydrogen Separation Membranes. Technical Report. *University of North Dakota*. Available at: <http://www.undeerc.org/ncht/>. (Accessed on 26 September 2013).
17. Sednin V. A., Chichko A. A., & Matyavin A. A. (2014) Energy System of the Biogas Complexes Based on the Fuel Elements. *Energiia i Menedzhment [Energy and Management]*, 4–5, 8–12 (in Russian).
18. Jradi M., & Riffat S. (2014) Tri-Generation Systems: Energy Policies, Prime Movers, Cooling Technologies, Configuration and Operation Strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 396–415. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.039.
19. Suther T., Fung A., Koksall M., & Zabihian F. (2010) Macro Level Modeling of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell. *Sustainability*, 2 (11), 3549–3560. DOI: 10.3390/su2113549.
20. Suther T., Fung A., Koksall M., & Zabihian F. (2010) Effects of Operating and Design Parameters on the Performance of a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine System. *International Journal of Energy Research*, 35 (7), 616–532. DOI: 10.1002/er.1722.

К 100-летию со дня рождения

Профессор Александр Митрофанович ЛЕОНКОВ (1915–1996)



Исполнилось 100 лет со дня рождения видного ученого, заслуженного энергетика Белорусской ССР, почетного энергетика СССР, бывшего заведующего кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского политехнического института (в настоящее время – Белорусский национальный технический университет), главного редактора журнала «Известия вузов СССР – Энергетика» в 1982–1987 гг., профессора А. М. Леонкова.

Александр Митрофанович родился 6 октября в деревне Круговец Жлобинского района Гомельской области в крестьянской семье. Трудовую деятельность начал в 1935 г. после окончания Херсонского морского техникума рыбной промышленности.

В 1937 г. он был призван в ряды Военно-Морского флота, а в 1939 г., после окончания службы, поступил в Одесский институт инженеров морского флота. В первые дни Великой Отечественной войны ушел добровольцем на фронт. В составе Черноморского флота участвовал в героической обороне Одессы, Севастополя, Кавказа. Награжден орденом Отечественной войны, медалями «За оборону Одессы», «За оборону Севастополя», «За оборону Кавказа», «За победу над Германией» и др. Закончил военную службу в 1946 г. на Балтийском флоте.

В 1947 г. А. М. Леонков продолжил учебу в Белорусском политехническом институте, который окончил в 1949-м, а в 1953 г., после окончания аспирантуры в Ленинградском политехническом институте, начал работу на кафедре «Тепловые электрические станции» БПИ, которую впоследствии возглавлял в течение двадцати лет. В 1978 г. ему было присвоено звание профессора.

Прекрасный педагог и методист, специалист, имеющий большой научный и практический опыт, ученый широкого кругозора и большой эрудиции, Александр Митрофанович много сил и энергии отдал подготовке инженерных и научных кадров для народного хозяйства нашей страны и стран ближнего и дальнего зарубежья. Он является автором более 220 научных трудов и учебно-методических работ, посвященных проблемам теплоэнергетики (паровые и газовые турбины, тепловые электрические станции). Под его руководством на кафедре было создано научное направление по повышению эффективности действующих тепловых электрических станций путем совершенствования технологического цикла и оборудования ТЭЦ на основе исследования агрегатов в натуральных условиях. Имел авторские свидетельства на изобретения.

Под руководством и при его участии выполнили кандидатские диссертации 26 аспирантов и соискателей.

Многогранна и общественная деятельность А. М. Леонкова. Он являлся председателем секции энергетики НТС Минвуза БССР, членом секции ТЭС НПС Минвуза СССР.

Награжден Почетной грамотой Минвуза СССР, двумя почетными грамотами Верховного Совета БССР, семью почетными грамотами Минвуза БССР и др.

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИКА» в 2015 г.

I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

1. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Баро Бандиа. О комплексной записи полной мощности при расчете электрических систем 3

Бялобржеский А. В., Качалка В. Ю., Власенко Р. В. Оценка взаимосвязи преобразований Фортескью и Кларка несимметричной системы векторов тока трехфазной линии 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ АВТОМАТИЗАЦИЯ

а) Автоматизация и релейная защита

Романюк Ф. А., Шевалдин М. А. Принципы выполнения токовой защиты линий с односторонним питанием от междуфазных коротких замыканий 1

Романюк Ф. А., Шевалдин М. А. Направления совершенствования токовых защит линий распределительных сетей 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И СЕТИ

а) Электрическая часть электростанций и подстанций

Новаш И. В., Румянцев Ю. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода . . . 1

Новаш И. В., Румянцев Ю. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования 5

Сафарян В. С., Геворгян С. Г. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины 6

Старжинский А. Л. Определение надежности схем электроснабжения собственных нужд атомной электрической станции 3

б) Электрические сети и линии электропередачи

Калентиюнок Е. В., Яковчиц Е. О. Определение расстояния до места междуфазного повреждения в воздушных распределительных электрических сетях на основе анализа гармонических составляющих параметров аварийного режима 4

Петруша Ю. С. Риски потери управляемости при либерализации электроэнергетической отрасли 3

Сергей И. И., Пономаренко Е. Г., Климович П. И., Долин А. П., Потапчик Я. В. Расчет электродинамической стойкости проводов воздушных линий 6

Фурсанов М. И., Дуль И. И. Выбор номинальной мощности силовых трансформаторов 2

Фурсанов М. И., Петрашевич Н. С. Определение потерь мощности в трансформаторах после нормативного срока эксплуатации 5

в) Техника высоких напряжений

- Гашимов А. М., Хыдыров Ф. Л.** Грозовая деятельность и грозозащита электроэнергетических устройств и оборудования на территории Республики Азербайджан 1

г) Электроснабжение городов, промышленных предприятий и сельского хозяйства

- Анищенко В. А., Иванов В. В.** Определение допустимых систематических перегрузок распределительных масляных трансформаторов 3
- Кривоносов В. Е., Василенко С. В.** Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей 6
- Нго Фыонг Ле, Гульков Г. И.** Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами 4
- Олексюк И. В.** Оценка значений индуцируемых токов в экранах силовых электрических кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена 4
- Олексюк И. В.** Применение суперконденсаторов в установках для испытания силовых электрических кабелей на термическую и динамическую стойкость 2
- Сивокобыленко В. Ф., Никифоров А. П., Бурлака В. В., Поднебенная С. К.** Анализ методов предотвращения автономной работы участков сети Smart Grid 0,4 кВ 2
- Фираго Б. И., Васильев Д. С.** К вопросу векторного управления асинхронными двигателями 5
- Хильмон В. И., Опейко О. Ф., Однолько Д. С.** Анализ динамики многодвигательного электропривода рельсового транспорта 1

2. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА**а) Теоретические основы теплотехники**

- Dobrego K. V.** Improvement of Accuracy of Radiative Heat Transfer Differential Approximation Method for Multi Dimensional Systems by Means of Auto-Adaptable Boundary Conditions
(Доброго К. В. Улучшение точности дифференциального приближения расчета теплообмена излучением в многомерных системах при использовании самосогласованных граничных условий) 1
- Кулаков Г. Т., Кухоренко А. Н., Голинко И. М.** Инвариантная система автоматического регулирования с использованием промежуточного сигнала теплоэнергетического параметра 1
- Осипов С. Н.** О стохастической оценке результатов волнового просвечивания твердых материалов при малом количестве измерений 3
- Сорокин В. В.** Моделирование элементов активной зоны ядерного реактора с толстым вращающимся слоем микротвэлов для трансмутации радиоактивных отходов 2

б) Тепловые электростанции. Теплоснабжение

- Грачев О. Е., Неуймин В. М., Настека Д. В.** Повышение эффективности ремонтов, изготовления и эксплуатации оборудования ТЭС путем применения технологий газотермического нанесения покрытий и лазерной наплавки 6
- Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Наумов А. Ю., Зенович-Лешкевич-Ольпинская А. Ю.** Создание и эффективность автоматической системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ (Часть 1) 3
- Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Наумов А. Ю., Зенович-Лешкевич-Ольпинская А. Ю.** Создание и эффективность автоматической системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ (Часть 2) 4

Неуймин В. М. Выбор направления технического перевооружения газомазутных блоков мощностью 300 МВт ТЭС стран Восточно-Европейского региона	2
Неуймин В. М. Основы теории вентиляционных процессов в паровых турбинах ТЭС	5
Пиир А. Э., Козак О. А., Агафонов И. М. Нормативный коэффициент теплопередачи жилого здания	5
Пиир А. Э., Кунтыш В. Б., Верещагин А. Ю. Энергоэффективность различных способов центрального теплоснабжения.	1
Романюк В. Н., Бобич А. А. Развитие тепловых схем ТЭЦ в условиях Объединенной энергосистемы Беларуси	4

в) Котельные установки и водоподготовка

Кулаков Г. Т., Кухоренко А. Н. Инвариантная система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла	2
Кулаков Г. Т., Кухоренко А. Н. Инвариантная система автоматического регулирования питания барабанного парового котла	5
Кухоренко А. Н. Методика расчета экономической эффективности инвариантной системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла	6
Николаев В. В. Напряженно-деформированное состояние ремонтируемого участка трубопровода	1

г) Промышленная теплоэнергетика

Бутенко А. Г., Смык С. Ю. Повышение эффективности струйного насоса при малых коэффициентах эжекции.	2
Романюк В. Н., Муслина Д. Б. Развитие энергоиспользования линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности	6
Романюк В. Н., Муслина Д. Б. Эксергия текстильных материалов	3
Седнин В. А., Чичко А. А. Оценка значимости влияния термодинамических факторов на эффективность работы твердоокисных топливных элементов	6
Чепурной М. Н., Резидент Н. В. Сравнительная эффективность применения тепловых насосов в низкотемпературных системах теплоснабжения	5

д) Тепло- и массообмен

Доброго К. В. Макрокинетические модели термического разложения доломита для расчета сорбционных систем газогенераторов	5
Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Яцевич А. В. Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи газового потока при продольном и поперечном обтекании круглотрубных поверхностей (Часть 1)	3
Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Яцевич А. В. Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи газового потока при продольном и поперечном обтекании круглотрубных поверхностей (Часть 2)	4
Манего С. А., Бумай Ю. А., Хорунжий И. А., Трофимов Ю. В. Анализ тепловых свойств линеек светодиодов методом переходных электрических процессов	6
Пшембаев М. К., Ковалев Я. Н., Акельев В. Д. Расчет полей температур и их градиентов в дорожных бетонных покрытиях	4
Хрусталева Б. М., Акельев В. Д., Матюшинцев Т. В., Костевич М. Ф. Моделирование конвективных потоков в пневмоопорных объектах (Часть 2)	1

е) Энергетика, экология, энергосбережение

Здор Г. Н., Сеницын А. В. Снижение энергозатрат повысительных насосных станций путем исключения завышенного давления в водопроводной сети	4
--	---

Мехдизадех Муждехи А. Оценка воздействия на окружающую среду объектов энергетики Исламской Республики Иран методом построения комбинированных пространственных моделей	4
Осипов С. Н., Пилипенко В. М. Энергоэффективные режимы теплоснабжения жилых зданий	2

3. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Кравцов М. В., Кравцов А. М. Общее уравнение закона гидравлического сопротивления при стесненном падении одиночного шара и движении жидкости в зернистых слоях	3
---	---

4. ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ

Ролик Ю. А., Горностай А. В. Анализ основных экономических показателей работы ветроустановок по результатам опыта коммерческой эксплуатации ветропарков Латвии	2
---	---

5. ЮБИЛЕИ

К 100-летию со дня рождения. Профессор Александр Митрофанович Леонков	6
--	---

II. ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Агафонов И. М., 5
Акельев В. Д., 1, 4
Анищенко В. А., 3

Б

Баро Бандиа, 3
Бобич А. А., 4
Бумай Ю. А., 6
Бурлака В. В., 2
Бутенко А. Г., 2
Бялобржеский А. В., 5

В

Василенко С. В., 6
Васильев Д. С., 5
Верещагин А. Ю., 1
Власенко Р. В., 5

Г

Гашимов А. М., 1
Геворгян С. Г., 6
Голинко И. М., 1
Горностай А. В., 2
Грачев О. Е., 6
Гульков Г. И., 4

Д

Доброго К. В., 1, 5
Долин А. П., 6
Дуль И. И., 2

Ж

Здор Г. Н., 4
Зенович-Лешкевич-Ольпинская А. Ю., 3, 4
Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., 3, 4

И

Иванов В. В., 3

К

Калентионок Е. В., 4
Качалка В. Ю., 5
Климкович П. И., 6
Ковалев Я. Н., 4

Козак О. А., 5
Костевич М. Ф., 1
Кравцов А. М., 3
Кравцов М. В., 3
Кривоносов В. Е., 6
Кулаков Г. Т., 1, 2, 5
Кунтыш В. Б., 1, 3, 4
Кухоренко А. Н., 1, 2, 5, 6

М

Манего С. А., 6
Матюшинец Т. В., 1
Мехдизадех Муждехи А., 4
Муслина Д. Б., 3, 6

Н

Настека Д. В., 6
Наумов А. Ю., 3, 4
Нго Фьюнг Ле, 4
Неуймин В. М., 2, 5, 6
Никифоров А. П., 2
Николаев В. В., 1
Новаш И. В., 1, 5

О

Однолько Д. С., 1
Олексюк И. В., 2, 4
Опейко О. Ф., 1
Осипов С. Н., 2, 3

П

Петрашевич Н. С., 5
Петруша Ю. С., 3
Пиир А. Э., 1, 5
Пилипенко В. М., 2
Поднебенная С. К., 2
Пономаренко Е. Г., 6
Потачиц Я. В., 6
Пшембаев М. К., 4

Р

Резидент Н. В., 5
Ролик Ю. А., 2
Романюк В. Н., 3, 4, 6
Романюк Ф. А., 1, 2
Румянцев Ю. В., 1, 5

С

Сафарян В. С., 6
Седнин В. А., 6
Сергей И. И., 6
Сивокобыленко В. Ф., 2
Синицын А. В., 4
Смык С. Ю., 2
Сорокин В. В., 2
Старжинский А. Л., 3
Сухоцкий А. Б., 3, 4

Т

Трофимов Ю. В., 6

Ф

Фираго Б. И., 5
Фурсанов М. И., 2, 5

Х

Хильмон В. И., 1
Хорунжий И. А., 6
Хрусталёв Б. М., 1
Хыдыров Ф. Л., 1

Ч

Чепурной М. Н., 5
Чичико, А. А., 6

Ш

Шевалдин М. А., 1, 2

Я

Яковчиц Е. О., 4
Яцевич А. В., 3, 4