

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

**ЭНЕРГЕТИКА**

Том 60, № 3  
2017

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 базы данных:  
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,  
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

|                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Короткевич М. А., Старжинский А. Л.</b> Анализ структурной надежности главных схем электрических соединений атомных электростанций .....                                         | 191 |
| <b>Новаш И. В.</b> Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени .....                                                   | 198 |
| <b>Глушко В. И., Дерюгина Е. А.</b> Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения ..... | 211 |
| <b>Сафарян В. С.</b> Исследование переходных и стационарных режимов синхронной двухмашинной системы .....                                                                           | 228 |

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА**

|                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Дударев В. В., Филатов С. О., Карлович Т. Б.</b> Методика расчета и анализ коэффициента теплопередачи биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения с неравномерным внешним загрязнением ..... | 237 |
| <b>Троценко А. В.</b> Анализ экономии затрат энергии в криогенных системах за счет использования теплообменных аппаратов .....                                                                                     | 256 |
| <b>Лабкович О. Н.</b> Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок .....                                                                                      | 265 |

**ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ**

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Зорина Т. Г.</b> Регламентирование деятельности блок-станций на традиционных видах топлива ..... | 276 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

### Редакционная коллегия

- С. Н. АСАМБАЕВ (Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан),  
В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),  
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),  
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),  
В. А. ДЖАНГИРОВ (Комитет ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК, Москва, Российская Федерация),  
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),  
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),  
П. В. ЖУКОВСКИЙ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),  
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (первый заместитель главного редактора),  
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),  
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),  
Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),  
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбри, Великобритания),  
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),  
Е. С. МИШУК (Исполнительный комитет Энергетического совета Содружества Независимых Государств, Москва, Российская Федерация),  
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),  
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),  
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),  
Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),  
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),  
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),  
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),  
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),  
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),  
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (ООО, Киев, Украина),  
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),  
Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),  
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
Л. В. ШЕНЕЦ (Евразийская экономическая комиссия, Москва, Российская Федерация)*

### 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 19.05.2017. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага мелованная.  
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз.  
Дата выхода в свет . 2017. 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; energy-bntu@mail.ru  
<http://energy.bntu.by>

---

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017

ISSN 1029-7448 (Print)  
ISSN 2414-0341 (Online)

PROCEEDINGS OF THE CIS  
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS  
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

**ENERGETIKA**

V. 60, No 3  
2017

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 the following databases:  
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,  
Lan, CyberLeninka, Socionet

**CONTENTS**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

|                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Korotkevich M. A., Starzinskij A. L.</b> The Analysis of Structural Reliability of the Main Electric Connection Circuits of Nuclear Power Plants .....                                          | 191 |
| <b>Novash I. V.</b> Modeling of Power Systems and Testing of Relay Protection Devices in Real and Model Time .....                                                                                 | 198 |
| <b>Glushko V. I., Deryugina E. A.</b> Determination of the Level of Overvoltage in the Secondary Circuits of Substations when Lightning Impulse Voltage is Distributed in High-Voltage Buses ..... | 211 |
| <b>Safaryan V. S.</b> Study of Transient and Stationary Operation Modes of Synchronous System Consisting in Two Machines. ....                                                                     | 228 |

HEAT POWER ENGINEERING

|                                                                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Dudarev V. V., Filatau S. O., Karlovich T. B.</b> The Method of Calculation and Analysis of Heat Transfer Coefficient of Bimetallic Finned Tubes of Air Cooling Units with Irregular External Contamination ..... | 237 |
| <b>Trotsenko A. V.</b> Analysis of Energy Consumption Economy in Cryogenic Systems by the Use of Heat Exchangers. ....                                                                                               | 256 |
| <b>Labkovich O. N.</b> Reduction of Friction Losses due to the Vortex Flow of the Magnetic Fluid Caused by the Additives of Carbon Nanotubes. ....                                                                   | 265 |

POWER ENGINEERING ECONOMICS

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Zoryna T. G.</b> Function Regulation of Customer's Plant that Burn Traditional Types of Fuel ..... | 276 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

### Editorial Board

- S. N. ASAMBAEV (Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan),  
W. T. WÓJCIK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),  
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),  
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),  
V. A. JANGIROV (RF CCI Committee on Energy Strategy and the Development of Fuel-Energy Complex, Moscow, Russian Federation),  
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),  
I. V. ZHEZHELENKO (Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine),  
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),  
A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (First Deputy Editor-in-Chief),  
A. I. KIRILLOV (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation),  
A. KONNOV (Lund University, Sweden),  
B. K. MAKSIMOV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),  
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),  
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),  
E. S. MISHUK (The Executive Committee of the Energy Council of the Commonwealth of Independent States, Moscow, Russian Federation),  
NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),  
O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),  
E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine),  
E. N. SABUROV (Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation),  
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),  
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),  
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),  
B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),  
V. A. STROEV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),  
V. I. TIMOSHPOLSKY (LLC, Kiev, Ukraine),  
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),  
E. UŠPURAS (Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania),  
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
L. V. SHENETS (The Eurasian Economic Commission, Moscow, Russian Federation)

### Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5<sup>th</sup>  
Reg. No 1257

Typesetting and makeup are made in editorial office  
of Journals "Energetika" and "Science and Technique"

---

Passed for printing 19.05.2017. Dimension of paper 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Coated paper.  
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet .  
An edition of 250 copies. Date of publishing 2017. 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; energy-bntu@mail.ru  
<http://energy.bntu.by>

---

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

© Belarusian National Technical University, 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-191-197

УДК 621.315

## Анализ структурной надежности главных схем электрических соединений атомных электростанций

М. А. Короткевич<sup>1)</sup>, А. Л. Старжинский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Определена надежность главной схемы электрических соединений атомной электрической станции, на которой установлено два блока мощностью 1200 МВт каждый. Надежность, экономичность, маневренные свойства атомной электрической станции во многом определяются ее главной схемой, поэтому выбор схемы при проектировании и ее состояние в процессе эксплуатации – важнейшие задачи. Главные схемы электрических соединений атомной электрической станции выбираются на основании схемы сетей энергосистемы и того участка, к которому присоединяется данная электростанция. Схема присоединения атомной электрической станции к энергосистеме в нормальных исходных режимах на всех стадиях сооружения такой станции должна обеспечивать выдачу полной введенной мощности атомной электростанции и сохранение устойчивости ее работы в энергосистеме без воздействия противоаварийной системной автоматики при отключении любой отходящей линии электропередачи. При выборе главной схемы учитываются: единичная мощность устанавливаемых агрегатов и их число; очередность развития станции и энергосистемы; напряжения, на которых выдается электроэнергия станции; токи короткого замыкания для распределительного устройства повышенного напряжения и необходимость их ограничения схемным путем; наибольшая мощность, которая может быть потеряна при повреждении любого выключателя. Модель надежности главной схемы электрических соединений призвана выявить все виды аварий, возможных при совпадении отказов элементов с ремонтными и эксплуатационными режимами, отличающимися составом и повреждаемостью оборудования, а также при развитии аварий из-за отказов срабатывания аппаратов и устройств релейной защиты и автоматики.

**Ключевые слова:** главная схема, электрические соединения, надежность, атомная электрическая станция

**Для цитирования:** Короткевич, М. А. Анализ структурной надежности главных схем электрических соединений атомных электростанций / М. А. Короткевич, А. Л. Старжинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 3. С. 191–197. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-191-197

## The Analysis of Structural Reliability of the Main Electric Connection Circuits of Nuclear Power Plants

М. А. Korotkevich<sup>1)</sup>, A. L. Starzhinskij<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The reliability of the main circuit of electrical connections at a nuclear electric power plant that has two units with a capacity of 1,200 MW each has been determined. Reliability,

---

### Адрес для переписки

Короткевич Михаил Андреевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-65-82  
elsyst@bntu.by

### Address for correspondence

Korotkevich Mikhail A.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-65-82  
elsyst@bntu.by

---

economical, maneuverable properties of the atomic power plant under study are largely determined by its main circuit, so the choice of the circuit for the design and its status in the process of operation occur to be critical objectives. Main electrical connection circuits in nuclear electric power plants are selected on the basis of the schematic networks of the energy system and the land attached to the plant. The circuit of the connection of a nuclear power plant to the grid in the original normal operating modes at all stages of the construction of such a plant should provide the outcome of the full added capacity of a nuclear power plant and the preservation of its stability in the power system without the influence of the emergency system automatics when any outgoing transmission line is disabled. When selecting the main circuit the individual capacity of the installed units and their number are taken into account as well as the order of development of the plant and power supply system; the voltage on which the power of a plant is delivered; a short-circuit current for switchgear high voltage and the need for their limitation by circuit means; the most power that can be lost when damage to any switch. A model of reliability of the main circuit of electrical connections is designed to detect all types of accidents that are possible at the coincidence of failures of elements with the repair and operational modes that differs in composition and damageability of the equipment, as well as under conditions of the development of accidents due to failure of operation of devices of relay protection and automation.

**Keywords:** main circuit, electrical connections, reliability, nuclear power plant

**For citation:** Korotkevich M. A., Starzhinskij A. L. (2017) The Analysis of Structural Reliability of the Main Electric Connection Circuits of Nuclear Power Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 191–197. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-191-197 (in Russian)

В Республике Беларусь идет строительство атомной электростанции (АЭС), на которой будут установлены два блока мощностью 1200 МВт каждый. При проектировании схемы выдачи мощности от атомной электростанции и выборе номинального напряжения отходящих линий принималось во внимание имеющееся напряжение 330 кВ в прилегающих сетях энергосистемы.

Схемы электрических соединений АЭС строятся по блочному принципу. Между генератором и повышающим трансформатором устанавливается выключатель. Мощность блочных повышающих трансформаторов выбирается исходя из мощности присоединенных к ним генераторов блока. Параллельная работа блоков осуществляется на повышенном напряжении.

К схемам распределительных устройств (РУ) 35–750 кВ электростанций предъявляются следующие требования по надежности электроснабжения:

- повреждение или отказ любого из выключателей, а также повреждение на развилке шинных разъединителей не должны, как правило, приводить к отключению более одного энергоблока и одной или нескольких линий (при обеспечении устойчивости параллельной работы станции с энергосистемой);
- отказ выключателя в отключении другого поврежденного выключателя данного распределительного устройства, а также совпадения отказа или повреждения одного из выключателей с ремонтом другого не должны приводить к отключению более двух энергоблоков и линий (при обеспечении устойчивости параллельной работы станции с энергосистемой);

- отключение линий электропередачи, как правило, производится не более чем двумя выключателями, повышающих трансформаторов, трансформаторов связи и трансформаторов собственных нужд – не более чем двумя выключателями распределительного устройства каждого повышенного напряжения;

- должна быть обеспечена возможность ремонта выключателей напряжением 330 кВ без отключения соответствующих присоединений;

- при питании от данного распределительного устройства двух резервных трансформаторов собственных нужд должна быть исключена возможность отключения обоих трансформаторов [1, с. 114].

Основное отличие электрической части атомных электростанций от электрической части тепловых электростанций (ТЭС) на органическом топливе заключается в таком построении главной схемы электрических соединений, которое обеспечивает гораздо более высокую надежность связи с энергосистемой [2, с. 197; 3, с. 3; 4, с. 122].

Главная схема электрических соединений АЭС, где генераторы и повышающие трансформаторы соединены по схеме укрупненного блока, а распределительное устройство выполнено по полуторной схеме, показана на рис. 1.

Расчет надежности главных схем электрических соединений электростанций выполним с помощью программы TOPAS. Пакет прикладных программ TOPAS, разработанный на кафедре «Электрические станции» Санкт-Петербургского политехнического университета (руководитель разработки докт. техн. наук, проф. Ю. Б. Гук), позволяет проводить анализ надежности главных схем электрических соединений, включающих в себя РУ любого класса напряжения, генераторные присоединения, высоковольтные линии электропередачи (ВЛ), присоединения резервных трансформаторов собственных нужд (РТСН) и трансформаторы связи между РУ.

Вычисление логических показателей надежности главной схемы осуществляется на основе определения количества комбинаций событий (конъюнкций)  $C(k)$ , приводящих к отказу ее функционирования  $k$ -го вида [5, с. 59; 6, с. 109; 7, с. 89]

$$C(k) = \sum_i \sum_j \sum_s L(i, j, s, k), \quad (1)$$

где  $L(i, j, s, k)$  – логическая функция, принимающая значение 0 или 1.

Вычисление частот отказов функционирования  $k$ -го вида  $\lambda(k)$  и длительности аварийного восстановления  $T(k)$  в общем случае осуществляется по выражениям [5, с. 59; 8, с. 120]:

$$\lambda(k) = \sum_i \sum_j q(j) \lambda(i) Q(s/i) L(k); \quad (2)$$

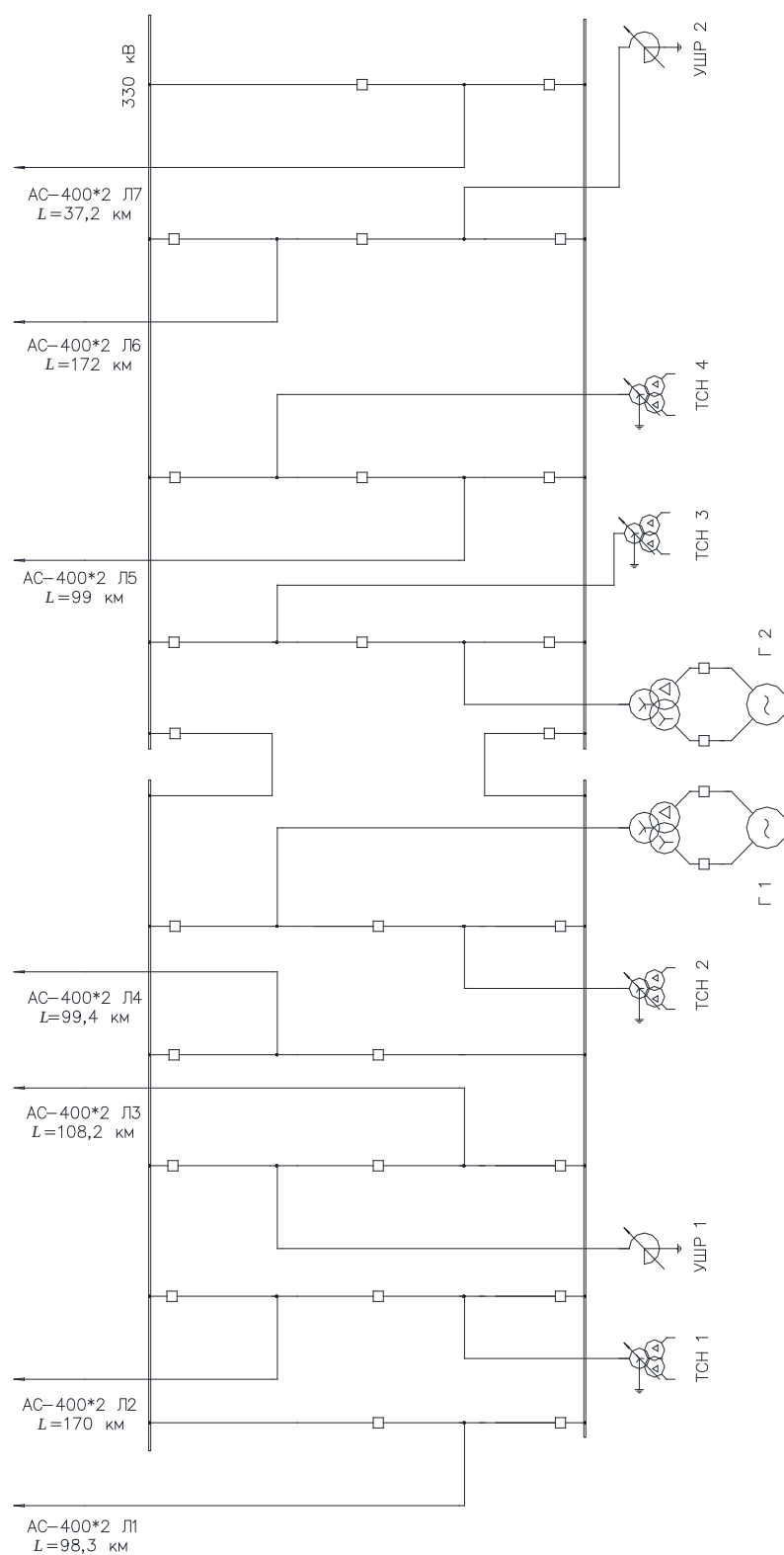


Рис. 1. Главная схема электрических соединений атомной электростанции: Л1 – воздушная линия электропередачи; TCH – трансформатор собственных нужд; Г – генератор; УШР – управляемый шунтирующий реактор

Fig. 1. The main wiring circuit of a nuclear power plant: Л1 – overhead transmission line; TCH – auxiliary transformer; Г – generator; УШР – controlled shunt reactor

$$T(k) = \frac{1}{\lambda(k)} \sum_i \sum_j q(j) \lambda(i) \min \left\{ \frac{t(j)}{2}; t(i); t_{\text{оп}} \right\} Q(s/i) L(k), \quad (3)$$

где  $q(j)$  – относительная длительность  $j$ -го ремонтного режима, о. е.;  $\lambda(i)$  – частота повреждения  $i$ -го элемента схемы, 1/год;  $t(j)$  – длительность  $j$ -го ремонтного режима работы схемы, ч;  $t(i)$  – то же послеаварийного восстановления  $i$ -го элемента схемы, ч;  $t_{\text{оп}}$  – время оперативных переключений, ч;  $Q(s/i)$  – вероятность отказа в срабатывании релейной защиты или коммутационного аппарата.

Коэффициент неготовности потребителей  $K_n$  вычисляется по выражению [5, с. 73]

$$K_n = \frac{T(k)\lambda}{8760}. \quad (4)$$

Данные по надежности элементов распределительных устройств напряжением 330 кВ приведены в табл. 1 [9, с. 268–270; 10, с. 105].

Таблица 1

## Показатели надежности элементов электростанций

## The reliability indices of elements of power plants

| Элемент РУ                                   | Частота отказа $\lambda$ , 1/год | Время послеаварийного восстановления $T_{\text{в}}$ , ч | Частота планового ремонта $\lambda_{\text{рем}}$ , 1/год | Длительность планового ремонта $T_{\text{рем}}$ , ч |
|----------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Блочный турбогенератор ТВВ-1200              | 1,0000                           | 200,0                                                   | 1,000                                                    | 1080                                                |
| Блочный турбогенератор ТВВ-320-2             | 0,7100                           | 58,0                                                    | 0,236                                                    | 227                                                 |
| Трансформатор 330 кВ мощностью более 80 МВ·А | 0,0410                           | 74,0                                                    | 1,000                                                    | 30                                                  |
| Элегазовый выключатель напряжением 330 кВ    | 0,0150                           | 36,8                                                    | 0,080                                                    | 200                                                 |
| Сборные шины 330 кВ (на одно присоединение)  | 0,0130                           | 5,0                                                     | 0,166                                                    | 3                                                   |
| Линия электропередачи 330 кВ на 1 км         | 0,0025                           | 13,6                                                    | 0,350                                                    | 20                                                  |

Вероятность отказа выключателя при отключении короткого замыкания принимали 0,002, время оперативных переключений в расчетах – 0,5 ч. Результаты расчета частоты и длительности аварийных отключений (в укрупненных кодах аварий) для схемы электрических соединений АЭС, представленной на рис. 1, приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, полное погашение электростанции возможно с частотой  $2,22 \cdot 10^{-5}$  1/год. Наибольшая частота внезапных отказов характерна для потери одного генератора, одной линии или одного трансформатора собственных нужд.

Таблица 2

**Частота и длительность аварийных отключений (в укрупненных кодах аварий)  
главной схемы электрических соединений атомной электростанции**

**The frequency and duration of emergency power outages (in the integrated codes  
of accidents) of the main circuits of electric connections of a nuclear power plant**

| Код аварии | Суммарная частота,<br>1/год | Среднее время<br>восстановления, ч | Коэффициент<br>неготовности, о. е. |
|------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1Г         | 2.16E+00                    | 188,98                             | 4.6598E-02                         |
| 2Г 7Л      | 2.22E-05                    | 186,29                             | 4.7210E-07                         |
| 1Л         | 2.11E+00                    | 13,13                              | 3.1626E-03                         |
| 1Г 4Л 1Н   | 6.10E-04                    | 0,50                               | 3.4817E-08                         |
| 1Г 1Л      | 3.13E-03                    | 11,95                              | 4.2698E-06                         |
| 2Г 6Л 1Н   | 9.77E-07                    | 0,50                               | 5.5765E-11                         |
| 2Г 7Л 1Н   | 3.23E-07                    | 0,50                               | 1.8436E-11                         |
| 1Л 1Н      | 6.69E-02                    | 0,50                               | 3.8185E-06                         |
| 1Г 1Л 1Н   | 1.30E-04                    | 0,50                               | 7.4201E-09                         |
| 1Г 1Л 2Н   | 7.30E-07                    | 0,50                               | 4.1667E-11                         |
| 1Г 3Л 1Н   | 1.52E-04                    | 0,50                               | 8.6758E-09                         |
| 1Г 2Л 2Н   | 2.43E-07                    | 0,50                               | 1.3870E-11                         |
| 1Г 2Л      | 5.31E-04                    | 0,50                               | 3.0308E-08                         |
| 1Н         | 3.00E-01                    | 42,48                              | 1.4548E-03                         |
| 1Г 1Н      | 3.07E-02                    | 0,51                               | 1.7873E-06                         |
| 2Н         | 1.31E-04                    | 0,50                               | 7.4772E-09                         |
| 1Г 2Н      | 1.25E-07                    | 0,50                               | 7.1347E-12                         |
| 1Г 2Л 1Н   | 9.84E-07                    | 0,50                               | 5.6164E-11                         |
| 1Л 2Н      | 4.35E-07                    | 0,50                               | 2.4829E-11                         |

*Примечание.* В укрупненных кодах запись 1Г означает потерю любого одного из генераторов, запись 2Г 7Л – отключение одновременно двух любых генераторов и семи воздушных линий, 1Н – отключение одного трансформатора собственных нужд.

Для сопоставительного примера авторами выполнен расчет надежности схемы выдачи мощности от конденсационной электростанции (КЭС) установленной мощностью 2400 МВт с восемью турбогенераторами мощностью 300 МВт каждый. Распределительное устройство напряжением 330 кВ выполнено так же, как и на АЭС, по полуторной схеме, с тем же самым количеством отходящих линий напряжением 330 кВ. Здесь полное погашение электростанции – одновременное отключение восьми генераторов и семи отходящих линий – оказывается невозможным, т. е. коэффициент неготовности практически равен нулю.

Суммарная частота отключений четырех генераторов и трех линий схемы КЭС равна  $2,62 \cdot 10^{-5}$  1/год. Однако коэффициент неготовности схемы КЭС значительно меньше коэффициента неготовности схемы АЭС. Это обусловлено тем, что на КЭС установлено большее количество генераторов меньшей мощности, характеризующихся более низким значением параметра потока отказов.

## ВЫВОД

Существенное влияние на показатели структурной надежности схем выдачи мощности оказывают количество и номинальная мощность генерирующих источников, параметр потока отказов которых возрастает с увеличением номинальной мощности. При наличии одного или двух энергоблоков на атомной электростанции вероятность ее полного погашения не исключается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балаков, Ю. Н. Надежность схем выдачи мощности электростанций / Ю. Н. Балаков, А. Т. Шевченко, А. В. Шунтов. М.: Изд-во МЭИ, 1993. 128 с.
  2. Электрическая часть электростанций / под ред. С. В. Усова. 2-е изд. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1987. 616 с.
  3. Фельдман, М. Л. Особенности электрической части атомных электростанций / М. Л. Фельдман, А. К. Черновец. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 172 с.
  4. Балаков, Ю. Н. Проектирование схем электроустановок / Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. 2-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 288 с.
  5. Черновец, А. К. Элементы САПР электрической части АЭС на персональных компьютерах / А. К. Черновец. СПб.: Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т, 1992. 89 с.
  6. Гук, Ю. Б. Теория надежности / Ю. Б. Гук, В. В. Карпов, А. А. Лапидус. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 171 с.
  7. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1988. 224 с.
  8. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1990. 208 с.
  9. Электротехнический справочник: в 4 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]; гл. ред. А. И. Попов. 9-е изд. М.: МЭИ, 2004. Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии. 964 с.
  10. Васильев, А. П. Надежность электроэнергетических установок и систем: теория и практика / А. П. Васильев, Ю. Б. Гук, В. В. Карпов. СПб.: ГУ Ленгосэнергонадзор, 2000. 413 с.
- Поступила 09.09.2016 Подписана в печать 10.11.2016 Опубликовано онлайн 30.05.2017

## REFERENCES

1. Balakov Yu. N., Shevchenko A. T., Shuntov A. V. (1993) *Reliability of the Patterns of Output from Power Plants*. Moscow, MEI Publ. 128 (in Russian).
2. Usov S. V., Mikhalev B. N., Chernovets A. K., Kizevetter E. N., Kantan V. V. (1987) *Electral Section of Power Plants*. 2<sup>nd</sup> ed. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Division. 616 (in Russian).
3. Feldman M. L., Chernovets A. K. (1983) *Specific Features of Electral Sections of Nuclear Power Plants*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 172 (in Russian).
4. Balakov Yu. N., Misrikhanov M. Sh., Shuntov A. V. (2006) *Designing Electrical Circuits Patterns*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, MEI Publ. 288 (in Russian).
5. Chernovets A. K. (1992) *CAD Elements of Electrical Section of a Nuclear Power Plant Fulfilled with the Aid of PC*. St.-Petersburg, St.-Petersburg State University. 89 (in Russian).
6. Guk Yu. B., Karpov V. V., Lapidus A. A. (2009) *Reliabilty Theory*. St.-Petersburg, Polytechnic University Publ. 171 (in Russian).
7. Guk Yu. B. (1988) *Reliability Analysis of Power Installations*. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Branch. 224 (in Russian).
8. Guk Yu. B. (1990) *Theory of Reliability in the Power Industry*. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Branch. 208 (in Russian).
9. Gerasimov V. G., Dyakov A. F., Ilinskii N. F., Labuntsov V. A., Morozkin V. P., Orlov I. N., Stroev V. A. (2004) *Electrical Engineering Reference Guide. Vol. 3. Production, Transmission and Distribution of Electric Power*. Moscow, MEI Publ. 964 (in Russian).
10. Vasilev A. P., Guk Yu. B., Karpov V. V. (2000) *Reliability of Power Installations and Systems: Theory and Practice*. St.-Petersburg, Lengosenergonadzor State Institution. 413 (in Russian).

Received: 9 September 2016 Accepted: 10 November 2016 Published online: 30 May 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-198-210

УДК 621.316.925

## Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени

И. В. Новаш<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Рассмотрены методы моделирования режимов энергосистем и испытания устройств релейной защиты с помощью комплексов моделирования в реальном времени и с помощью компьютерных программных комплексов, позволяющих выполнять моделирование в режиме условного масштаба времени. Информационные входные сигналы защиты при моделировании в режиме условного модельного времени получаются в ходе вычислительного эксперимента, а испытания устройств защиты проводятся с помощью аппаратно-программных испытательных комплексов с использованием расчетных входных сигналов. Исследование устойчивости энергосистемы при изменении режимов генерирующего и потребляющего электрооборудования, состояния устройств релейной защиты требует проведения испытаний с помощью цифровых симуляторов в режиме замкнутого контура. При этом должны быть определены (смоделированы) обратные связи между функционирующей в режиме реального времени моделью энергосистемы и внешними устройствами или их моделями. Выполнено моделирование в режиме реального времени и проведен анализ мирового опыта использования цифровых симуляторов энергосистемы для моделирования в реальном времени (RTDS-симулятор). Приведены примеры использования комплексов RTDS зарубежными энергокомпаниями для проверки систем релейной защиты и управления, тестирования взаимодействия различного оборудования и устройств автоматического регулирования, анализа кибербезопасности и оценки функционирования энергосистем при различных сценариях протекания чрезвычайных ситуаций. Представлены количественные данные по распространению RTDS в различных странах мира и России. Отмечается, что ведущие энергетические вузы России используют симуляторы реального времени не только для решения научно-технических задач, но и для проведения учебных и лабораторных занятий по моделированию электрических сетей и противоаварийной автоматики со студентами и аспирантами. Для проверки работоспособности устройств релейной защиты без учета реакции энергосистемы испытания могут проводиться в режиме разомкнутого контура с использованием аппаратно-программных испытательных комплексов. Предложены способы испытания релейных защит и их моделей в режиме разомкнутого контура.

**Ключевые слова:** цифровые симуляторы, RTDS, моделирование, режим реального времени, программное обеспечение, MatLab, Simulink, SimPowerSystems, компьютерный программный комплекс, Omicron CMC 356

**Для цитирования:** Новаш, И. В. Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени / И. В. Новаш // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 3. С. 198–210. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-198-210

---

### Адрес для переписки

Новаш Иван Владимирович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-71-93  
EiE@bntu.by

### Address for correspondence

Novash Ivan V.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-71-93  
EiE@bntu.by

---

## Modeling of Power Systems and Testing of Relay Protection Devices in Real and Model Time

I. V. Novash<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The methods of modelling of power system modes and of testing of relay protection devices with the aid the simulation complexes in real time and with the help of computer software systems that enables the simulation of virtual time scale are considered. Information input protection signals in the simulation of the virtual model time are being obtained in the computational experiment, whereas the tests of protective devices are carried out with the help of hardware and software test systems with the use of estimated input signals. Study of power system stability when modes of generating and consuming electrical equipment and conditions of devices of relay protection are being changed requires testing with the use of digital simulators in a mode of a closed loop. Herewith feedbacks between a model of the power system operating in a real time and external devices or their models must be determined (modelled). Modelling in real time and the analysis of international experience in the use of digital simulation power systems for real-time simulation (RTDS simulator) have been fulfilled. Examples are given of the use of RTDS systems by foreign energy companies to test relay protection systems and control, to test the equipment and devices of automatic control, analysis of cyber security and evaluation of the operation of energy systems under different scenarios of occurrence of emergency situations. Some quantitative data on the distribution of RTDS in different countries and Russia are presented. It is noted that the leading energy universities of Russia use the real-time simulation not only to solve scientific and technical problems, but also to conduct training and laboratory classes on modelling of electric networks and anti-emergency automatic equipment with the students. In order to check serviceability of devices of relay protection without taking into account the reaction of the power system tests can be performed in an open loop mode with the use of hardware and software test systems. Testing methods for relay protection and their models in open-loop mode have been proposed.

**Keywords:** digital simulations, RTDS, simulation, real-time, software, MatLab, Simulink, SimPowerSystems, computer software system, OMICRON CMC 356

**For citation:** Novash I. V. (2017) Modeling of Power Systems and Testing of Relay Protection Devices in Real and Model Time. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 198–210. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-198-210 (in Russian)

### Введение

Энергосистема Беларуси – постоянно развивающаяся сфера, формирование которой на современном этапе определяется комплексным планом развития с учетом ввода Белорусской атомной электростанции [1]. Согласно этому плану, до 2025 г. предусматриваются строительство и реконструкция электрических сетей и подстанций, установка электродвигателей на тепловых электрических станциях и в котельных ГПО «Белэнерго», строительство пиково-резервных энергоисточников на базе газотурбинных установок либо газопоршневых агрегатов, проработка вопроса о развитии зарядной инфраструктуры для электромобильного транспорта. Главной задачей интеграции Белорусской атомной электростанции в Объединенную белорусскую энергосистему является повышение надежности и эффективности работы всей Белорусской энергосистемы.

Эффективно решать задачи устойчивости и надежности функционирования сложной энергосистемы позволяют современные цифровые устрой-

ства управления, защиты и автоматики. Усложнение электрических сетей электроснабжения, разнообразие их режимов работы, появление альтернативных источников энергии требуют дальнейшего совершенствования устройств, обеспечивающих защиту электрооборудования в аварийных режимах. В связи с этим возникают вопросы проектирования новых типов защит с изменяемыми алгоритмами функционирования и предварительного их испытания в условиях, максимально приближенных к реальным. Наиболее эффективный способ таких испытаний – моделирование, которое позволяет проверить работоспособность новых устройств и получить первичный опыт их эксплуатации. Кроме того, технологии моделирования дают возможность получить необходимую информацию для принятия обоснованных решений по выбору первичной схемы, типов и параметров оборудования, оптимизации режимов электрических сетей, анализа аварийных ситуаций, прогнозирования поведения энергосистемы [2]. Моделирование становится одним из основных инструментов развития инновационных направлений электроэнергетики.

#### **Моделирование энергосистемы и испытание устройств релейной защиты в режиме реального времени**

Моделирование режимов энергосистемы, при котором расчет параметров системы (мгновенных значений токов, напряжений и др.) в ходе вычислительного эксперимента на ЭВМ получается в темпе, соответствующем скорости протекания процессов, называют моделированием в режиме реального времени. Цифровое моделирование энергосистемы в реальном времени с физическим подключением устройств релейной защиты к модели на сегодняшний день является наиболее эффективным методом, применяемым при разработке, для тестирования и оптимизации вторичного электрооборудования, а также для исследования режимов функционирования энергосистемы в переходных и аварийных режимах [3, 4]. Такой метод моделирования предъявляет очень жесткие требования к аппаратной части вычислительного комплекса по скорости вычислений и передачи данных от модели к испытываемому устройству. Подключаемое к моделирующему комплексу внешнее устройство защиты должно функционировать с организацией всех обратных связей между моделью и этим устройством. При изменении режима модели энергосистемы изменение состояния испытываемой защиты, а также ответная реакция энергосистемы должны происходить максимально приближенно к тому, как это случается в реальных условиях.

Первые комплексы моделирования в реальном времени (КМРВ) появились в 60-е гг. XX ст. и были аналоговыми (электромеханическими) симуляторами для исследования переходных электромагнитных процессов [5]. С развитием микропроцессорных технологий появилась возможность создать полностью цифровые симуляторы. В основу их работы был положен алгоритм, разработанный Германом Доммелем, согласно которому вычисления производятся дискретно с некоторым временным шагом [6].

Кроме того, для проведения расчета процессов в темпе скорости их реального протекания необходимо при сохранении времени вычисления в пределах одного временного шага производить разделение вычислений между несколькими процессорами или даже процессорными блоками [4]. Таким образом, чем больше скорость протекания реальных процессов, тем большая потребность в вычислительной мощности моделирующего комплекса. Это условие требует индивидуального подбора конфигурации аппаратной части КМРВ для решаемых задач моделирования и определяет основную стоимость моделирующего комплекса.

Один из первых цифровых КМРВ – симулятор энергосистемы для моделирования в реальном времени (Real Time Digital Simulator, RTDS), разработанный в Исследовательском центре силовых систем постоянного тока провинции Манитоба (Виннипег, Канада) в конце 1980-х гг. Дальнейшее развитие аппаратно-программного комплекса RTDS осуществлялось канадской компанией RTDS Technologies (рис. 1) [3, 7].

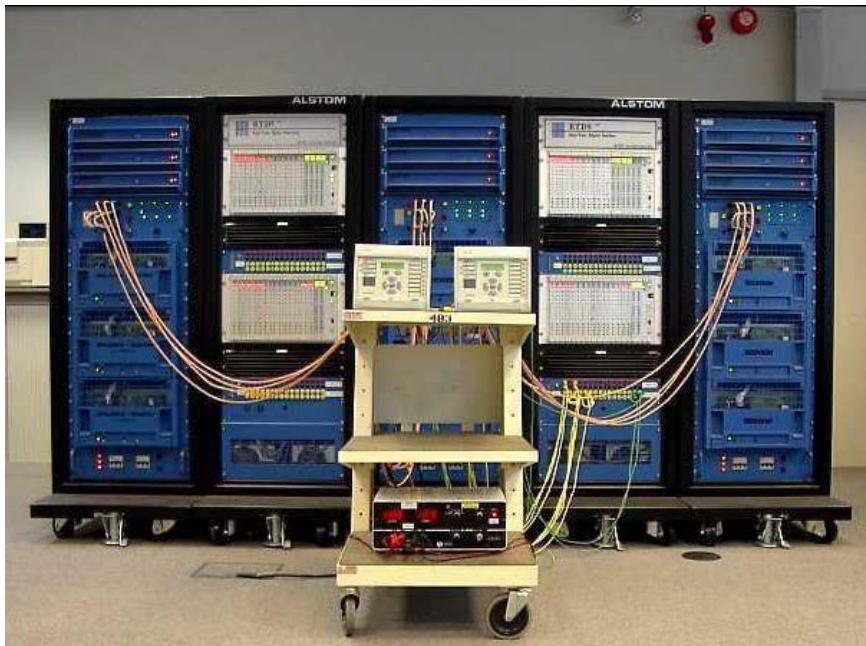


Рис. 1. Аппаратно-программный испытательный комплекс RTDS

Fig. 1. The RTDS hardware and software testing facility

Симулятор RTDS позволяет объединить реальные устройства с виртуальной моделью среды их эксплуатации и проводить комплексные испытания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) с полноценной обратной связью и реакцией на изменение их состояния. Также RTDS дает возможность проводить исследования энергосистем в статическом и динамическом режимах, выполнять испытания устройств релейной защиты, включая устройства, работающие по протоколу МЭК-61850. С помощью испытательного комплекса можно исследовать работу систем автоматиче-

ского регулирования и управления, например систем автоматического регулирования возбуждения генераторов или контроллеров для силовой электроники; вырабатывать решения для повышения качества электрической энергии; обучать и проводить стажировку персонала и многое другое [3].

В [8] приводятся примеры использования комплексов RTDS крупными зарубежными энергокомпаниями. Так, Южнокитайская электросетевая компания (China Southern Grid, CSG – крупнейшая энергетическая компания в Китае) создала самый большой в мире цифровой RTDS-симулятор, состоящий из 34 кассет для моделирования и включающий в себя широкий набор различных процессорных блоков, устройств ввода/вывода и сетевых интерфейсов. Специалисты CSG использовали симулятор реального времени для выполнения работ по восстановлению энергосистемы после сильной снежной бури и ледяного дождя, повредивших более 7000 линий электропередачи. При восстановлении энергосистемы инженеры CSG регулярно применяли симулятор, проверяя с его помощью правильность планируемых действий.

Интересен опыт использования RTDS крупной энергетической компанией на юго-западе США «Южная Калифорния – Эдисон» (SCE) [8]. Она управляет линиями электропередачи протяженностью почти 20 тыс. км, распределительными сетями протяженностью более 140 тыс. км. Компания SCE обеспечивает электроснабжение 14 млн потребителей. SCE начала использовать симулятор в 2009 г. только с двумя кассетами и в настоящее время владеет симулятором с 24 кассетами. Компания SCE широко применяет RTDS для проверки систем релейной защиты и управления, тестирования взаимодействия различного оборудования и устройств автоматического регулирования, анализа кибербезопасности и оценки функционирования энергосистемы при различных сценариях протекания чрезвычайных ситуаций.

По данным (на 2016 г.) ЗАО «ЭнЛАБ» – эксклюзивного представителя компании RTDS Technologies Ltd. в России [9], RTDS Technologies осуществила поставку более 300 комплексов с более чем 1300 вычислительными кассетами в 40 стран мира (табл. 1). Согласно [9], в табл. 2 представлено распространение RTDS в России. Необходимо отметить, что ведущие энергетические вузы России используют симуляторы реального времени не только для решения научно-технических задач, но и для проведения учебных и лабораторных занятий по моделированию электрических сетей и противоаварийной автоматики со студентами и аспирантами [10, 11].

Комплексов, подобных RTDS, в организациях ГПО «Белэнерго», и тем более в высших учебных заведениях Беларуси, готовящих специалистов в области электроэнергетики, на сегодняшний момент нет. Задачи, которые возникают при интеграции Белорусской атомной станции в Объединенную белорусскую энергосистему, могли бы быть успешно решены с использованием подобных цифровых симуляторов. Однако чрезмерно высокая стоимость данных комплексов является основной проблемой их применения в проектных, научно-исследовательских и учебных организациях Беларуси.

Таблица 1

Количество пользователей RTDS по странам (по данным на 2016 г.)

The number of RTDS users by country (according 2016 data)

| Страна            | Пользователи<br>(вычислительные<br>кассеты) | Страна         | Пользователи<br>(вычислительные<br>кассеты) |
|-------------------|---------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------|
| Китай             | 78 (351)                                    | Дания          | 2 (14)                                      |
| США               | 43 (193)                                    | Тайвань        | 2 (13)                                      |
| Южная Корея       | 25 (76)                                     | ОАЭ            | 2 (9)                                       |
| Япония            | 23 (95)                                     | Финляндия      | 2 (7)                                       |
| Бразилия          | 17 (51)                                     | Новая Зеландия | 2 (5)                                       |
| Канада            | 13 (46)                                     | Филиппины      | 2 (3)                                       |
| Великобритания    | 10 (62)                                     | Нидерланды     | 1 (8)                                       |
| Индия             | 10 (38)                                     | Казахстан      | 1 (6)                                       |
| Россия            | 8 (14)                                      | Бельгия        | 1 (4)                                       |
| Германия          | 7 (72)                                      | Индонезия      | 1 (4)                                       |
| Италия            | 7 (17)                                      | Венесуэла      | 1 (2)                                       |
| Австралия         | 5 (34)                                      | Намибия        | 1 (2)                                       |
| Южная Африка      | 5 (17)                                      | Польша         | 1 (2)                                       |
| Испания           | 5 (9)                                       | Словения       | 1 (2)                                       |
| Малайзия          | 4 (18)                                      | Таиланд        | 1 (2)                                       |
| Франция           | 4 (6)                                       | Эстония        | 1 (2)                                       |
| Швеция            | 3 (54)                                      | Греция         | 1 (1)                                       |
| Саудовская Аравия | 3 (48)                                      | Катар          | 1 (1)                                       |
| Сингапур          | 3 (7)                                       | Португалия     | 1 (1)                                       |
| Мексика           | 3 (4)                                       | Швейцария      | 1 (1)                                       |

Таблица 2

Пользователи RTDS в России (по данным на 2014 г.)

The RTDS Users in Russia (according 2014 data)

| Предприятие России,<br>имеющее RTDS | Год              | Использование                                                                                                               |
|-------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары           | 2008             | Исследования РЗА                                                                                                            |
| НПП «ЭКРА», г. Чебоксары            | 2009, 2011       | НИОКР при создании устройств автоматики ликвидации асинхронного режима и защиты генераторов, квалификационные испытания РЗА |
| НИУ «МЭИ», г. Москва                | 2011, 2012, 2013 | Исследования регуляторов возбуждения, устройств векторных измерения (PMU), РЗА                                              |
| ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», г. Москва        | 2012             | Аттестация РЗА, исследование аппаратуры цифровых подстанций                                                                 |
| ОАО «НТЦ ЕЭС», г. Санкт-Петербург   | 2012, 2013       | Исследования, настройка и аттестация регуляторов возбуждения. Исследования аппаратуры вставок постоянного тока и РЗА        |
| ТПУ, г. Томск                       | 2013             | Учебные и лабораторные занятия по моделированию электрических сетей и противоаварийной автоматики                           |
| КНИТУ-КАИ, г. Казань                | 2013             | Занятия по РЗА для студентов, исследования и разработка новых алгоритмов РЗА                                                |
| ГК «ТЕКОН», г. Москва               | 2014             | Исследования в области релейной защиты                                                                                      |

Исследование устойчивости энергосистемы при изменении режимов генерирующего и потребляющего электрооборудования, состояния устройств релейной защиты требует проведения испытаний с помощью цифровых симуляторов в режиме замкнутого контура. При этом должны быть определены (смоделированы) обратные связи между функционирующей в режиме реального времени моделью энергосистемы и внешними устройствами или их моделями. Для проверки работоспособности устройств релейной защиты без учета реакции энергосистемы испытания могут проводиться в режиме разомкнутого контура с использованием аппаратно-программных испытательных комплексов (АПИК).

### **Моделирование энергосистемы и испытание устройств релейной защиты в автономном режиме модельного времени**

Моделирование, при котором время вычисления каждого модельного временного интервала превышает время, необходимое для реального протекания процесса, называется автономным или независимым моделированием. Расчет заданного интервала времени моделируемого процесса может занимать значительно большее время, чем реальная его длительность. Результаты моделирования в виде массивов мгновенных значений расчетных величин записываются во внешний файл результатов. Сохраненные результаты могут быть использованы другими программными средствами для визуализации их в виде временных диаграмм, определения средних, действующих, максимальных и минимальных значений.

Для проведения испытаний устройств релейной защиты в разомкнутом цикле результаты автономного моделирования сохраняются в унифицированном формате цифровых осциллограмм COMTRADE [12] и далее с помощью АПИК из них формируются аналоговые сигналы, которые в режиме реального времени подаются на входы испытываемого устройства. Разомкнутый цикл проведения испытаний не требует таких сложных и дорогостоящих аппаратных комплексов, как симуляторы RTDS. В состав АПИК входит персональный компьютер (ПК), в котором реализуются модель энергосистемы или обобщенного электроэнергетического объекта (ОЭО) и программное обеспечение (ПО), управляющее испытательным устройством и режимом проведения испытаний. В качестве испытательного устройства могут быть использованы микропроцессорные аппаратно-программные диагностические комплексы НПП «Динамика» (Россия) [13] типа «РЕТОМ» компании OMICRON (на базе устройства СМС 356) (рис. 2) [14] или аналогичные комплексы других производителей.

Структурная схема АПИК представлена на рис. 3. Моделирование ОЭО проводится с помощью компьютерных программных комплексов, которые могут быть либо в виде самостоятельных программных продуктов, либо реализованы в компьютерных системах динамического моделирования типа MatLab-Simulink.

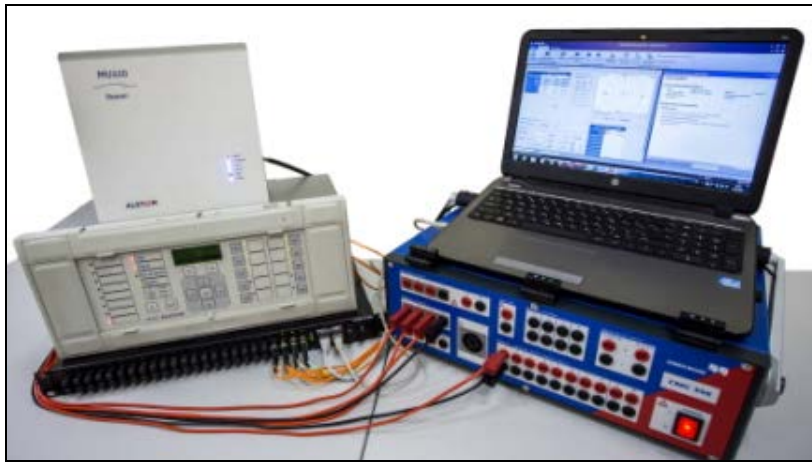


Рис. 2. Аппаратно-программный испытательный комплекс на базе устройства CMC 356 компании OMICRON

Fig. 2. The hardware and software test system on the basis of the CMC 356 device of OMICRON Company

В состав ПО испытательных устройств входят специализированные программы, обеспечивающие выбор, воспроизведение и просмотр заранее подготовленных осциллограмм аварийных процессов в формате COMTRADE. Также имеются специализированные программы моделирования ОЭО. Основной недостаток этих программ – ограниченный и малодокументированный набор математических моделей силового оборудования, что не позволяет в полной мере моделировать сложные режимы и схемы ОЭО. Также в них не предусмотрена возможность создания пользовательских моделей силового оборудования.

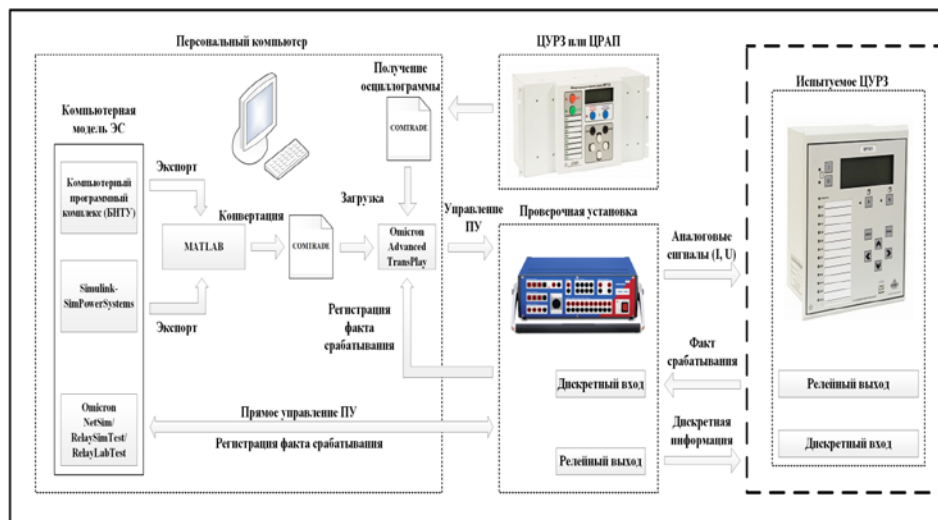


Рис. 3. Аппаратно-программный испытательный комплекс

Fig. 3. A hardware and software testing facility

На кафедре «Электрические станции» БНТУ под руководством автора накоплен большой опыт по математическому моделированию электроэнергетических объектов и разработке компьютерных программ для исследования поведения устройств релейных защит и их моделей методом вычислительного эксперимента [15, 16]. Так, для проведения испытаний цифровых устройств релейной защиты с помощью комплекса СМС 356 компании OMICRON разработаны компьютерные программные комплексы (КПК), позволяющие получать методом вычислительного эксперимента входные информационные сигналы релейных защит линий электропередачи (рис. 4) и силовых трансформаторов (рис. 5, 6).

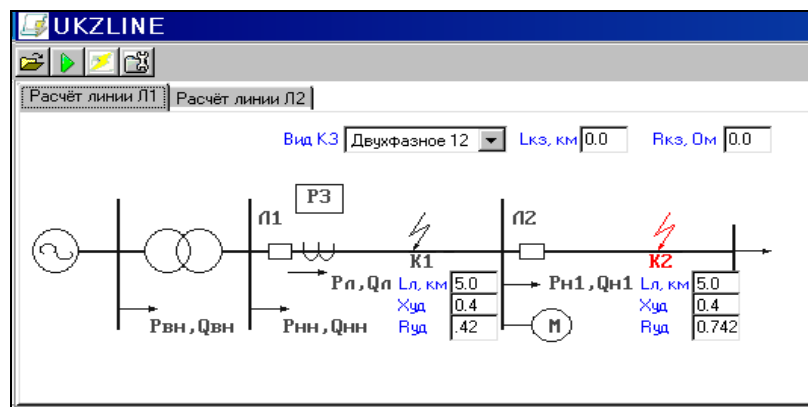


Рис. 4. Компьютерный программный комплекс для расчета режимов удаленных замыканий на линиях электропередачи 6(10)–35 кВ

Fig. 4. A computer software package for the calculation of the modes of remote short circuits on transmission lines 6(10)–35 kV

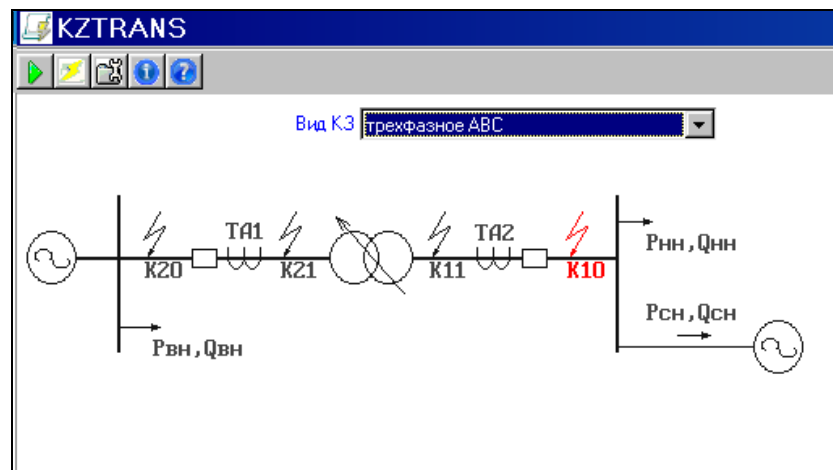


Рис. 5. Компьютерный программный комплекс для расчета аварийных режимов двухобмоточного трехфазного трансформатора

Fig. 5. A computer software package for the calculation of the emergency regimes of two-winding three-phase transformer

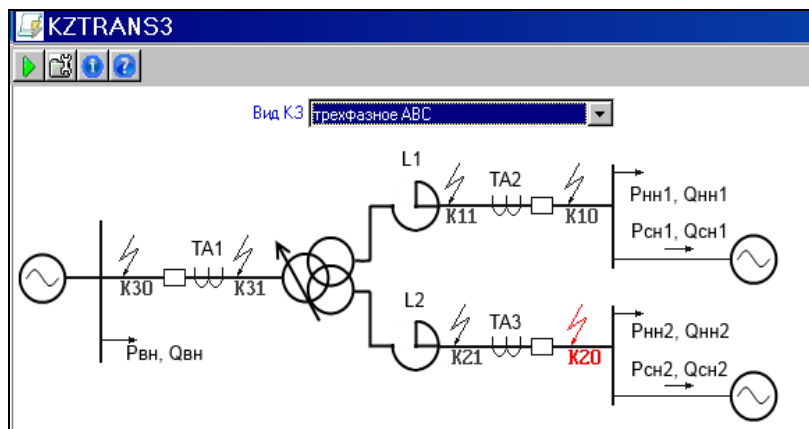


Рис. 6. Компьютерный программный комплекс для расчета аварийных режимов трехобмоточного трехфазного трансформатора

Fig. 6. A computer software package for the calculation of the emergency regimes of three-winding three-phase transformer

Основным достоинством разработанных КПК является то, что с их помощью можно выполнять расчеты входных сигналов защиты – вторичных токов трансформаторов тока – с учетом их несинусоидальных форм, обусловленных наличием в энергосистеме нелинейных элементов, и насыщения магнитопроводов силового и измерительных трансформаторов (рис. 7), что в большей степени соответствует реальным условиям аварийных режимов. Результаты расчетов программных комплексов сохраняются в формате COMTRADE и могут быть использованы в качестве исходных данных испытательных комплексов.

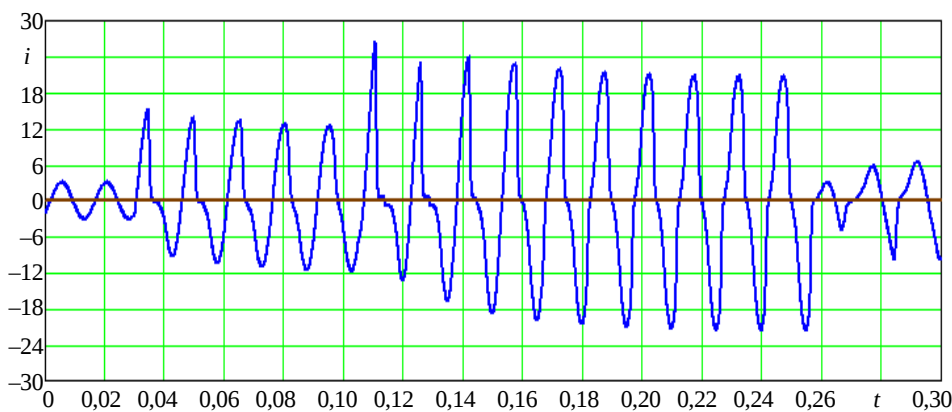


Рис. 7. Вторичный ток трансформатора тока аварийного режима:

—  $i_2$

Fig. 7. Secondary current of the current transformer emergency:

—  $i_2$

Применение системы динамического моделирования MatLab-Simulink [17] позволяет создавать компьютерные испытательные комплексы (КИК),

совместно моделирующие защищаемый объект и исследуемую защиту (рис. 8) [18]. Основным достоинством таких КИК является то, что они могут быть реализованы только с использованием ПК и позволяют проводить испытания модели защиты на стадии проектирования и отработки ее функциональных возможностей методом вычислительного эксперимента.

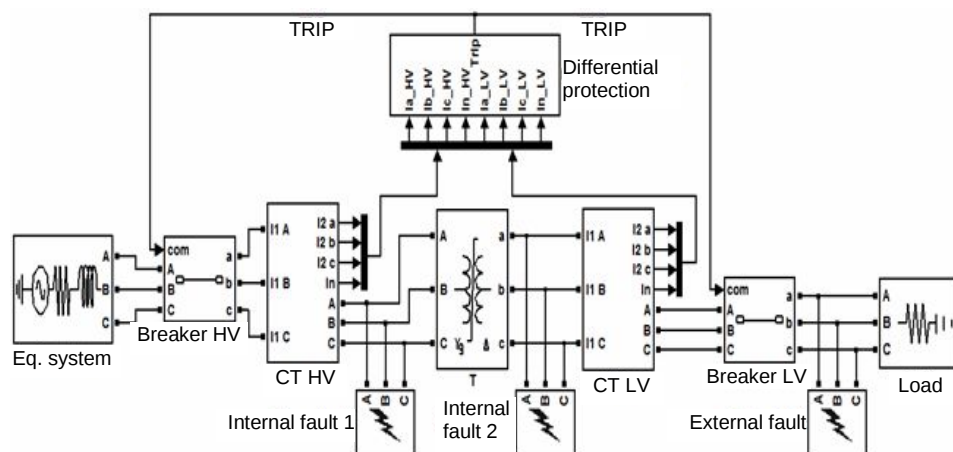


Рис. 8. Компьютерный испытательный комплекс дифференциальной защиты силового трехфазного трансформатора

Fig. 8. Computer test set differential protection three phase power transformer

Накопленный опыт в моделировании энергосистем [18–20] и испытании устройств релейной защиты позволяет рекомендовать на начальной стадии разработки новых устройств отказаться от использования дорогих аппаратно-программных испытательных комплексов, а использовать более дешевые и безопасные компьютерные испытательные комплексы.

## ВЫВОДЫ

1. Моделирование становится одним из основных инструментов развития инновационных направлений электроэнергетики. Исследование устойчивости энергосистемы при изменении режимов генерирующего и потребляющего электрооборудования, состояния устройств релейной защиты можно проводить с помощью цифровых комплексов моделирования в режиме реального времени и в режиме замкнутого контура.

2. Проверку работоспособности устройств релейной защиты без учета реакции энергосистемы можно проводить в режиме разомкнутого контура с использованием аппаратно-программных испытательных комплексов.

3. На начальной стадии разработки новых устройств релейной защиты можно отказаться от использования дорогих аппаратно-программных испытательных комплексов и проводить проверку работоспособности защит с помощью более простых компьютерных испытательных комплексов методом вычислительного эксперимента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство энергетики Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minenergo.gov.by>. Дата доступа: 18.02.2017.
2. Нудельман, Г. С. Применение технологий моделирования в развитии инновационных направлений электроэнергетики / Г. С. Нудельман, А. А. Наволочный, О. А. Онисова // Релейщик. 2014. № 2. С. 16–19.
3. Законьшек, Я. Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени / Я. Законьшек, А. Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация. 2012. № 1. С. 66–72.
4. Мочалов, Д. О. Комплексы моделирования в реальном времени для современных энергосистем / Д. О. Мочалов, Я. В. Законьшек, М. А. Шамис // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 1 (10). С. 70–74.
5. Законьшек, Я. Моделирование энергосистем в реальном времени [Электронный ресурс] / Я. Законьшек // Цифровая подстанция. Режим доступа: <http://digitalsubstation.ru/blog/2013/12/02/modelling/#more-5206>. <http://minenergo.gov.by>. Дата доступа: 18.02.2017.
6. Dommel, H. W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks / H. W. Dommel // IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems. 1969. Vol. Pas-88, No 4. P. 388–399.
7. RTDS Technologies [Electronic Resource]. Mode of Access: <http://www.rtds.com>. Date of Access: 26.11.2016.
8. Сидволл, К. Об опыте использования симуляторов реального времени крупными энергокомпаниями / К. Сидволл, М. А. Шамис // ЭнергоStyle. 2015. № 03. С. 20–21.
9. Сайт ЗАО «ЭнЛАБ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.enmlab.ru](http://www.enmlab.ru) Дата доступа: 18.02.2017.
10. Иванов, А. RTDS на кафедре РЗАЭС НИУ МЭИ [Электронный ресурс] / А. Головин // Цифровая подстанция. Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/blog/2011/11/23/rtds-na-kafedre-rziae-s-me-i-tu>. Дата доступа: 18.02.2017.
11. Гуркова, П. RTDS установлен в Томском политехническом университете [Электронный ресурс] / П. Гуркова // Сайт ЗАО «ЭнЛАБ». Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/blog/2013/10/02/rtds/> Дата доступа: 18.02.2017.
12. IEEE Standard. Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems: IEEE Std C37.111-1999. Approved 18 March 1999 / Power Systems Relay Committee of the IEEE Power Engineering Society. NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999. 56 p.
13. Научно-производственное предприятие «Динамика» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dynamics.com.ru> Дата доступа: 08.03.2016.
14. Сайт компании OMICRON [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.omicronenergy.com/en> Дата доступа: 08.03.2016.
15. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. 174 с.
16. Новаш, И. В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2013. 226 с. ISBN 978-985-550-236-5.
17. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPower-Systems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
18. Румянцев, Ю. В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора / Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 3. С. 203–224. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-203-224.
19. Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12–24.
20. Новаш, И. В. Реализация математической модели трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 3. С. 19–28.

Получена 22.11.2016 Подписана в печать 20.01.2017 Опубликовано онлайн 30.05.2017

## REFERENCES

1. *The Ministry of Energy of the Republic of Belarus*. Available at: <http://minenergo.gov.by/> (Accessed 18 February 2017) (in Russian).
2. Nudelman G. S., Navolochnyi A. A., Onisova O. A. (2014) Application of Modeling Technologies to the Innovative Development of Electric Power Engineering. *Releishchik* [Protection Engineer], (2), 16–19 (in Russian).
3. Zakonshek Ya., Slavutskii A. L. (2012) Digital Modeling of Modern Power Systems in Real Time. *Releynaya Zashchita i Avtomatizatsiya* [Relay Protection and Automation], (1), 66–72 (in Russian).
4. Mochalov D. O., Zakonshek Ya. V., Shamis M. A. (2013) Complexes of Real-Time Simulation for Modern Power Systems. *Releynaya Zashchita i Avtomatizatsiya* [Relay Protection and Automation], 10 (1), 70–74 (in Russian).
5. Zakonshek Ya. (2013) Modeling of Power Systems in Real Time with the Use of RTDS. *Digital Substation*. Available at: <http://digitalsubstation.ru/blog/2013/12/02/modelling/#more-5206>. <http://minenergo.gov.by/> (Accessed 18 February 2017) (in Russian).
6. Dommel H. W. (1969) Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, Pas-88 (4), 388–399. DOI: 10.1109/TPAS.1969.292459.
7. *RTDS Technologies*. Available at: <http://www.rtds.com> (Accessed 16 November 2016).
8. Sidvoll K., Shamis M. A. (2015) On the Experience of the Use of Real-Time Simulators by Largest Energy Companies. *EnergoStyle*, (03), 20–21 (in Russian).
9. EnLAB. Available at: [www.enlab.ru](http://www.enlab.ru) (Accessed 18 February 2017) (in Russian).
10. Golovin A. (2011) RTDS at the Department of Line Protection and Automation of Power Systems. *Digital Substation*. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2011/11/23/rtds-na-kafedre-rziae-s-me-i-tu> (Accessed 18 February 2017) (in Russian).
11. Gurkova P. (2013) RTDS is Installed at the Tomsk Polytechnic University. *Digital Substation*. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2013/10/02/rtds/> (Accessed 18 February 2017) (in Russian).
12. IEEE Std C37.111-1999. Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems. NY, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 56.
13. “Dinamika” Research and Production Enterprise. Available at: <http://www.dynamics.com.ru> (Accessed 8 March 2016) (in Russian).
14. OMICRON. Available at: <https://www.omicronenergy.com/en> (Accessed 8 March 2016).
15. Romaniuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automation of Power Systems*. Minsk, VUZ-YuNITI. 174 (in Russian).
16. Novash V. I., Romaniuk F. A. (2013) *Mathematical Modeling of Switching Modes in Electrical Systems with Transformers*. Minsk, BNTU. 226 (in Russian).
17. Chernykh I. V. (2008) *Modeling of Electrical-and-Technical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press, St.-Petersburg, Piter Publ. 288 p. (in Russian).
18. Rumiantsev Yu. V. (2016) A Comprehensive Model for the Power Transformer Digital Differential Protection Functioning Research. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (3), 203–224 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-203-224.
19. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) Three-Phase Transformer Parameters Calculation Considering the Core Saturation for the MatLab-Simulink Transformer Model. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 12–24 (in Russian).
20. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2014) Mathematical Model Implementation of Wye-Connected Current Transformers in Dynamic Simulation System. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 19–28 (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227

УДК 621.311

## **Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения**

**В. И. Глушко<sup>1)</sup>, Е. А. Дерюгина<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Грозовой импульс напряжения, обусловленный набегающими с линии высокого напряжения на подстанцию волнами грозовых перенапряжений, вызывает ток в шинах, который вследствие магнитного влияния индуктирует во вторичных цепях перенапряжения. Перенапряжения в системе «провод – земля» рассматриваются как помехи, представляющие опасность в отношении возможности электрического повреждения устройств релейной защиты и автоматики подстанций. Используя обратное преобразование Лапласа, получено решение задачи магнитного влияния первичных цепей на вторичные цепи во временной области в зависимости от времени переходного процесса, который всегда возникает при распространении по шинам импульса напряжения. Выполнена оценка уровня перенапряжений в системе «провод – земля» для случая несрабатывания шинных нелинейных ограничителей перенапряжений и разрядников, когда грозовой импульс напряжения распространяется по шинам без деформации по их длине. Получены решения для перенапряжений во вторичных цепях, по которым можно оценить предельно повышенный, пониженный и средний повышенный уровни перенапряжений. Методом вычислительного эксперимента проведена оценка уровней перенапряжения для распределительных подстанций напряжением 110 и 220 кВ. Полученные результаты сопоставлены с нормируемыми значениями напряжения помех. Разработанный метод расчета импульсного магнитного влияния первичных цепей на вторичные цепи подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения для случая несрабатывания нелинейных ограничителей перенапряжений и разрядников на стадии проектирования и эксплуатации подстанций может использоваться как тестовый для оценки электрической стойкости устройств релейной защиты и автоматики от грозовых и коммутационных перенапряжений.

**Ключевые слова:** грозовой импульс напряжения, вторичные цепи, импульс магнитного влияния, заземление, уровень перенапряжения

**Для цитирования:** Глушко, В. И. Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения / В. И. Глушко, Е. А. Дерюгина // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 3. С. 211–227. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227

---

### **Адрес для переписки**

Дерюгина Елена Александровна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-71-63  
power.st@bntu.by

### **Address for correspondence**

Deryugina Elena A.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-71-63  
power.st@bntu.by

---

## Determination of the Level of Overvoltage in the Secondary Circuits of Substations when Lightning Impulse Voltage is Distributed in High-Voltage Buses

V. I. Glushko<sup>1)</sup>, E. A. Deryugina<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Lightning voltage impulse due to the waves of storm surge rolling out the high voltage line to a substation causes current to flow in the buses that, due to magnetic effect, induces overvoltage in the secondary circuit. Overvoltage in the system “wire – ground” is considered as obstructions which are hazard in relation to the possibility of electrical damage of the devices of relay protection and automation of substations. With the use of the inverse Laplace transformation, the solution of the problem the magnetic influence of the primary circuits to secondary circuits in the time domain depending on time of transition, which always occurs during the distribution of the voltage impulse in the buses, has been obtained. Estimation of the level of overvoltage in the system “wire – ground” for the case of failure of a bus nonlinear surges and arresters when lightning impulse of voltage is distributed on the buses along their length without deformation has been fulfilled. Solutions are obtained for overvoltage in the secondary circuits, according to which the levels of overvoltage can be estimated as “extremely stepped-up”, “lowered” and “averagely stepped-up” levels. With a method of computational experiment the levels of overvoltage for distribution substations with voltage 110 and 220 kV were assessed. The results are compared with the normalized values of the interference voltage. The suggested method of calculation of impulse magnetic influence of the primary circuits on the secondary circuits of substations while lightning impulse voltage is being distributed in high voltage buses for the case of failure of a nonlinear surge and arresters at the stage of design and operation of substations can be used as a test method for estimation of electrical durability of relay protection and automatic equipment from lightning and switching overvoltage.

**Keywords:** lightning impulse of voltage, secondary circuits, magnetic influence impulse, grounding, overvoltage level

**For citation:** Glushko V. I., Deryugina E. A. (2017) Determination of the Level of Overvoltage in the Secondary Circuits of Substations when Lightning Impulse Voltage is Distributed in High-Voltage Buses. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 211–227. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227 (in Russian)

### Задача исследования

В статье рассматривается косоугольный грозовой импульс напряжения, обусловленный набегающими с линии высокого напряжения на подстанцию волнами грозových перенапряжений. Импульс напряжения вызывает ток в шинах, который вследствие магнитного влияния индуктирует во вторичных цепях перенапряжения, принимаемых как источник импульсных помех. Оценивали максимальный уровень перенапряжений в системе «провод – земля» («жила – земля») для случая несрабатывания шинных нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) и разрядников, когда грозовой импульс напряжения распространяется по шинам без деформации по их длине. Перенапряжения в системе «провод – земля» рассматривали как помехи, представляющие опасность в отношении возможности элект-

рического повреждения устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) подстанций. Электрическую составляющую влияния не учитывали.

На практике режим несрабатывания ОПН и разрядников чаще всего связан с повреждением заземляющего проводника (спуска) к их заземлению. В этом случае грозовая волна не отражается от заземлителя ОПН и разрядников, а распространяется по шинам без искажения на всей длине сближения первичных и вторичных цепей.

В [1] показано, что действие грозового импульса напряжения на линии электропередачи характеризуется протеканием непериодического переходного процесса, который приближенно может быть описан на основе высокочастотных характеристик линий с последующим приведением его во временную область путем обратного преобразования Лапласа. С целью упрощения выполняемой задачи такую процедуру переходного процесса принимали и для высоковольтных шин при использовании частотных (высокочастотных) характеристик линий (шин) по [2], где рассмотрено решение задачи магнитного влияния воздушных линий электропередачи высокого напряжения на протяженные проводящие коммуникации, представленное как магнитное влияние первичных цепей на вторичные цепи. В исследованиях при оценке уровня перенапряжения в качестве первичных цепей принимали высоковольтные шины открытых подстанций высокого напряжения, вторичными цепями – кабели УРЗА, проложенные вблизи земли (в лотках).

Решение задачи магнитного влияния первичных цепей на вторичные цепи в [2] получено в частотной области в зависимости от угловой частоты  $\omega$ . В данной статье получено аналогичное решение во временной области в зависимости от времени переходного процесса  $t$ , который всегда возникает при распространении по шинам импульса напряжения.

При распространении по шинам грозового импульса напряжения магнитное влияние характеризуется распространением по вторичным цепям импульса продольной составляющей электрического поля  $E_x(j\omega)$ , которая согласно [2] определяется по формуле

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} I_{\pi} \left[ \ln \frac{(h_{\pi} + z)^2 + y^2}{(h_{\pi} - z)^2 + y^2} + 4 \int_0^{\infty} \frac{e^{-v(h_{\pi} + z)}}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} \cos vy \, dv \right], \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $k_3 = \sqrt{j\omega \frac{\mu_0}{\rho_3}}$  – волновое число

земли;  $\rho_3$  – удельное сопротивление земли;  $I_{\pi}$  – ток в первичной цепи;  $h_{\pi}$  – высота подвеса первичной цепи (шин) над землей;  $z, y$  – координаты точки наблюдения на вторичной цепи.

Для принятой задачи рассмотрим случай расположения кабелей вторичных цепей вблизи земли в лотках ( $z = 0$ ). Тогда решение для  $E_x(j\omega)$  в соответствии с [2] представляется в виде

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} I_\Pi \ln \frac{\left(h_{\text{ш}} + \frac{2}{k_3}\right)^2 + y^2}{h_{\text{ш}}^2 + y^2}. \quad (2)$$

Решение (2) будем считать точным; оно представлено в частотной области и является изображением во временной области  $E_x(t)$ . При практических расчетах оригинал  $E_x(t)$  целесообразно получить в явном виде, что достигается путем обратного преобразования Лапласа. Однако для логарифмической функции в (2) строгое обратное преобразование Лапласа в явном виде трудно выполнимо или просто невозможно. С учетом этого для представления  $E_x(j\omega)$  (2) во временной области  $E_x(t)$  требуется точное решение (2) заменить приближенным решением, допускающим получение обратного преобразования Лапласа в явном виде. Решение такой задачи представлено далее.

### Приближенное решение для $E_x(j\omega)$

Рассмотрим случай прокладки кабелей вторичных цепей вблизи земли в лотках ( $z = 0$ ). Тогда, учитывая соотношение  $\cos vy = \frac{1}{2}(e^{jvy} + e^{-jvy})$ , для (1) получим

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_\Pi \int_0^\infty \frac{e^{-vh_{\text{ш}}}}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} (e^{jvy} + e^{-jvy}) dv. \quad (3)$$

Для упрощения вычисления интеграла в (3) в [2] получено приближение для трансцендентной функции

$$F(v, k_3) = \frac{1}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} \cong \frac{1 - e^{-\frac{2v}{k_3}}}{2v}, \quad (4)$$

с помощью которого (3) представляется в виде

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} I_\Pi \left\{ \int_0^\infty \left[ e^{-v\eta_1} - e^{-v\left(\eta_1 + \frac{2}{k_3}\right)} \right] \frac{dv}{v} + \int_0^\infty \left[ e^{-v\eta_2} - e^{-v\left(\eta_2 + \frac{2}{k_3}\right)} \right] \frac{dv}{v} \right\}, \quad (5)$$

где  $\eta_1 = h_{\text{ш}} + jy$ ;  $\eta_2 = h_{\text{ш}} - jy$ .

Для интегралов в (5) используем функциональное соотношение [3]

$$e^{ax} - e^{bx} = (a - b)x \exp\left[\frac{1}{2}(a + b)x\right] \prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \frac{(a - b)^2 x^2}{4n^2 \pi^2}\right]. \quad (6)$$

Введем замену  $\eta = \begin{cases} h_{\text{ш}} + jy; \\ h_{\text{ш}} - jy, \end{cases}$  тогда в соответствии с (5) и (6) имеем:

$$x = v; a = -\eta; b = -\left(\eta + \frac{2}{k_3}\right); a - b = \frac{2}{k_3}; a + b = -2\left(\eta + \frac{1}{k_3}\right);$$

$$\prod_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \frac{(a-b)^2 x^2}{4n^2 \pi^2} \right] = \prod_{n=1}^{\infty} \left( 1 + \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} \right).$$

Сходимость  $\prod_{n=1}^{\infty} \left( 1 + \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} \right)$  устанавливается условием  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} = 0$ .

Из интеграла в (5) следует, что его главное значение определяется в области нуля переменной  $v$  ( $v \rightarrow 0$ ). С учетом этого  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} \equiv 0$ , т. е. абсолютно сходится. Кроме того, при  $v \rightarrow 0$   $\frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} = 0$ . Тогда

$\prod_{n=1}^{\infty} \left( 1 + \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} \right) = 1$ , и для  $E_x(j\omega)$  по (5) получим

$$\begin{aligned} E_x(j\omega) &= -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \left( \frac{1}{k_3 \eta_1 + 1} + \frac{1}{k_3 \eta_2 + 1} \right) = \\ &= -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \left( \frac{\beta_1}{\sqrt{j\omega + \beta_1}} + \frac{\beta_2}{\sqrt{j\omega + \beta_2}} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{где } \beta_1 = \frac{\sqrt{\rho_3}}{\sqrt{\mu_0} \eta_1}; \beta_2 = \frac{\sqrt{\rho_3}}{\sqrt{\mu_0} \eta_2}.$$

Сопряженные комплексные числа  $\eta_1 = h_{\text{ш}} + jy$  и  $\eta_2 = h_{\text{ш}} - jy$  определяют расстояние между точками на шинах и точками наблюдения на кабелях вторичных цепей, поэтому при расчете  $E_x(j\omega)$  их целесообразно представить модулями  $|\eta_1|$  и  $|\eta_2|$ . Поскольку  $|\eta_1| = |\eta_2| = \sqrt{h_{\text{ш}}^2 + y^2}$ , то  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$  и (7) принимает вид

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \frac{2}{k_3 \sqrt{h_{\text{ш}}^2 + y^2} + 1} = -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \frac{2\beta}{\sqrt{j\omega + \beta}}, \quad (8)$$

$$\text{где } \beta = \frac{\sqrt{\rho_3}}{\sqrt{\mu_0} \sqrt{h_{\text{ш}}^2 + y^2}}.$$

Испытательный уровень помех устанавливается по их модулю, поэтому в дальнейшем будем рассматривать  $E_x(j\omega)$  в (8) без знака «-». Сопоставим решение (8) с точным решением (2) для случая грозового косоугольного импульса напряжения с  $\tau_{\phi} = 2$  мкс при расположении кабелей вторичных цепей вблизи ближайшей фазы линии ( $y = 0$ ). Тогда для  $E_x(j\omega)$  по (2) и (8) будем иметь:

$$E_x(j\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \ln \left( 1 + \frac{2}{k_3 h_{ш}} \right); \quad (9)$$

$$E_x(j\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \frac{2}{k_3 h_{ш} + 1}. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что для оценки приближения решения (8) к (2) достаточно рассмотреть неравенство

$$\ln \left( 1 + \frac{2}{k_3 h_{ш}} \right) \approx \frac{2}{k_3 h_{ш} + 1}. \quad (11)$$

При преобразовании Лапласа заменяют  $j\omega$  оператором  $p$ , поэтому в  $k_3 \sqrt{j\omega} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega}$  можно заменить модулем  $|\sqrt{j\omega}| = \sqrt{\omega}$ . Частоту  $\omega$  прием равной эквивалентной частоте при расчете грозových перенапряжений  $\omega_3 = \frac{\pi}{2\tau_\phi} = \frac{\pi}{2\tau_0 \cdot 10^{-6}}$  ( $\tau_0$  – в секундах) [2, 4]. Тогда для (11) получим

$$F_1 = \ln \left( 1 + \frac{\sqrt{2\rho_3 \tau_0}}{h_{ш}} \right) \approx F_2 = \frac{2\sqrt{\rho_3 \tau_0}}{1,4h_{ш} + \sqrt{\rho_3 \tau_0}}. \quad (12)$$

По [4] для набегающих на подстанцию грозových волн перенапряжений косоугольный импульс напряжения имеет фронт волны  $\tau_\phi = 2$  мкс. Поэтому оценку приближения решения (8) к (2) выполним применительно к фронту  $\tau_\phi = 2$  мкс =  $\tau_0 \cdot 10^{-6}$  с ( $\tau_0 = 2$  с). Результаты сопоставления  $F_1$  и  $F_2$  в процентах для исходных данных ( $h_{ш} = 5,5$  (7; 10) м;  $\rho_3 = 100$  (250; 500) Ом·м;  $\tau_0 = 2$  с) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление функций  $F_1$  и  $F_2$   
The mapping of the functions  $F_1$  and  $F_2$

| $\rho_3$ , Ом·м | $h_{ш} = 5,5$ м |       |              | $h_{ш} = 7$ м |       |              | $h_{ш} = 10$ м |       |              |
|-----------------|-----------------|-------|--------------|---------------|-------|--------------|----------------|-------|--------------|
|                 | $F_1$           | $F_2$ | $\Delta$ , % | $F_1$         | $F_2$ | $\Delta$ , % | $F_1$          | $F_2$ | $\Delta$ , % |
| 100             | 1,534           | 1,295 | 15,58        | 1,350         | 1,181 | 12,49        | 1,099          | 1,005 | 8,52         |
| 250             | 1,909           | 1,488 | 22,09        | 1,708         | 1,391 | 18,58        | 1,426          | 1,230 | 13,75        |
| 500             | 2,212           | 1,608 | 27,28        | 2,000         | 1,527 | 23,66        | 1,700          | 1,386 | 18,44        |

На практике удельное сопротивление земли  $\rho_3$  определяется с погрешностью в среднем до 15 %. Поэтому указанные в табл. 1 погрешности допустимы, что вполне обуславливает правомерность замены точного решения (2) приближенным решением (8), которое позволяет осуществить преобразование  $E_x(p) = E_x(t)$  в явном виде.

Заменяя  $j\omega$  оператором  $p$ , представим (8) в операторном виде

$$E_x(p) = \frac{\mu_0}{\pi} I_{\pi} \frac{p\beta}{\sqrt{p} + \beta}. \quad (13)$$

Ток  $I_{\pi}$  в (13) определим по импульсу начального напряжения  $u_n(t)$  и волновому сопротивлению шин  $z_{\text{вш}}$ ; будем иметь  $I_{\pi} = i_{\pi}(t) = \frac{u_n(t)}{z_{\text{вш}}}$  [5].

Начальное напряжение представим косоугольным импульсом, который во временной и частотной областях описывается выражениями:

$$\begin{cases} u(t) = U_m \frac{t}{\tau_{\phi}}, & 0 < t < \tau_{\phi}; \\ U(p) = \frac{U_m}{\tau_{\phi} p^2}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $U_m$  – амплитуда начального напряжения.

С учетом (14) для (13) в операторном виде получим

$$E_x(p) = \frac{U_m}{z_{\text{вш}}} \frac{\mu_0}{\pi} \frac{\beta}{\tau_{\phi} p(\sqrt{p} + \beta)}. \quad (15)$$

В (15) при времени  $\tau_{\phi}$  в мкс ( $\tau_{\phi} = \tau_0 \cdot 10^{-6}$  с) имеем  $\frac{\mu_0}{\pi} \cdot \frac{1}{\tau_{\phi}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi \tau_0 \cdot 10^{-6}} =$

$\frac{0,4}{\tau_0}$ . Тогда (15) принимает вид

$$E_x(p) = 0,4 \frac{U_m}{z_{\text{вш}}} \delta u(p), \quad (16)$$

где  $\delta u(p) = \frac{\beta}{\tau_0 p(\sqrt{p} + \beta)}$  – импульс магнитного влияния первичных цепей

на вторичные цепи при распространении по шинам грозового импульса напряжения.

В  $\delta u(p)$  входит функция  $\varphi(p) = \frac{\beta}{p(\sqrt{p} + \beta)}$ , оригинал которой равен [6]

$$\varphi(t) = 1 - e^{\beta^2 t} \operatorname{erfc}(\beta \sqrt{t}), \quad (17)$$

где  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\varepsilon^2} d\varepsilon = 1 - \operatorname{erf}(x)$  – дополнительный интеграл вероятностей;

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\varepsilon^2} d\varepsilon$  – интеграл вероятностей.

По (16) с учетом (17) для  $\delta u(p)$  во временной области получим:

$$\delta u(t) \frac{1}{\tau_0} \left[ 1 - e^{x^2} \operatorname{erfc}(x) \right], \quad x = \beta \sqrt{t}; \quad 0 < t < \tau_\phi. \quad (18)$$

Для упрощения вычисления параметра  $e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)$  используем аппроксимацию  $\operatorname{erf}(x)$  рациональными функциями [6]

$$\operatorname{erf}(x) = 1 - (a_1 b + a_2 b^2 + a_3 b^3) e^{-x^2}, \quad (19)$$

где  $b = \frac{1}{1 + px}$ ;  $p = 0,47047$ ;  $a_1 = 0,3480242$ ;  $a_2 = -0,0958798$ ;  $a_3 = 0,7478556$ .

Из определения  $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ , тогда с учетом (19) получаем аппроксимацию параметра  $e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)$

$$e^{x^2} \operatorname{erfc}(x) = \frac{0,3480242}{1 + 0,47047x} - \frac{0,0958798}{(1 + 0,47047x)^2} + \frac{0,7478556}{(1 + 0,47047x)^3}. \quad (20)$$

При вычислении переменной  $x = \beta \sqrt{t}$  в (18) принимается  $\beta = \sqrt{\frac{\rho_3}{\mu_0(h_{\text{ш}}^2 + y^2)}} = \frac{\sqrt{\rho_3} \cdot 10^3}{\sqrt{0,4\pi} \sqrt{h_{\text{ш}}^2 + y^2}}$  (учитывается  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Импульс магнитного влияния  $\delta u(t)$  по (18) при исходных данных ( $h_{\text{ш}} = 5,5$  м;  $y = 0$ ;  $\tau = 2$  мкс;  $t = 0 \dots \tau_\phi$  мкс;  $\rho_3 = 50$  (100; 250; 500) Ом·м) представлен на рис. 1. При  $y = 0$  определяется максимальная величина импульса  $\delta u(t)$ .

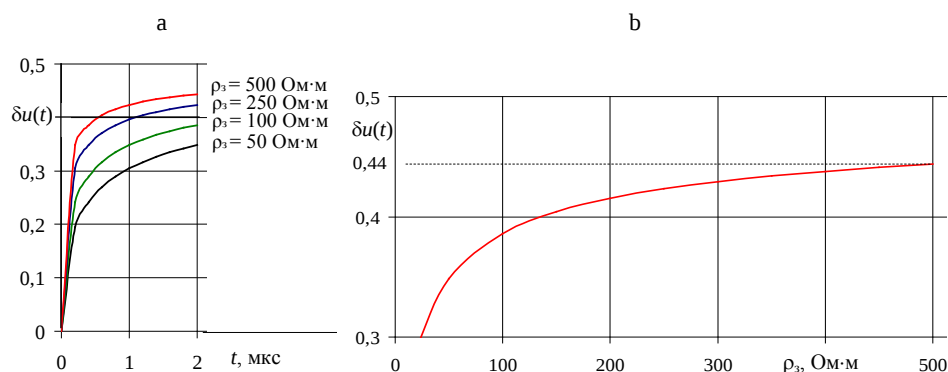


Рис. 1. Импульс магнитного влияния  $\delta u(t)$

Fig. 1. Magnetic influence impulse  $\delta u(t)$

Из (18) и рис. 1 следует, что при  $\rho_3 \rightarrow 0$   $\delta u(t) \rightarrow 0$ , а при  $\rho_3 \rightarrow \infty$   $\delta u(t) \rightarrow 0,5$ . Из этого предела вытекает важное практическое положение: в случае низкоомных грунтов уровень помех снижается, а при высокоомных грунтах – повышается. Подобный результат, описываемый зоной сте-

кания тока с заземлителя, получен в [7] при стекании импульсных токов с заземлителей в землю.

С учетом преобразования  $\delta u(p) = \delta u(t)$  окончательно для решения  $E_x(t)$  получим

$$E_x(t) = 0,4 \frac{U_m}{Z_{\text{вн}}} \delta u(t), \quad t > 0. \quad (21)$$

Импульс  $E_x(t)$  представляет собой падающую волну, которая распространяется по вторичным цепям и вызывает напряжение по отношению к земле, рассматриваемое как источник импульсных помех в УРЗА. Скорость распространения импульса  $E_x(t)$  в пределах длины параллельного сближения первичных и вторичных цепей  $l_{\text{пв}}$  определяет грозовой импульс напряжения, который распространяется по шинам примерно со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Заметим, что вне длины сближения  $l_{\text{пв}}$  для кабельных линий вторичных цепей импульс  $E_x(t)$  распространяется со скоростью  $v = 1/\sqrt{LC}$ , где  $L, C$  – погонные индуктивность и емкость жилы и экрана.

Для оценки действия импульса  $E_x(t)$  на вторичные цепи сопоставим длину волны импульса  $E_x(t)$   $\lambda_{\text{и}}$  с характерной минимальной и максимальной длинами сближения  $l_{\text{пв}} = 10 \dots 50$  м; будем иметь  $\lambda_{\text{и}} = \tau_{\text{ф}} c = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 = 600$  м  $\gg 10 \dots 50$  м. Поэтому если совместить амплитуду импульса  $E_x(t)$  при  $t = \tau_{\text{ф}}$  с началом длины сближения  $l_{\text{пв}}$  с учетом его монотонности на интервале определения  $t = 0 \dots 2$  мкс, то в пределах длины сближения  $l_{\text{пв}}$  величина импульса  $E_x(t)$  приближенно будет постоянной и равна его амплитуде  $E_x(\tau_{\text{ф}})$ .

К такому выводу можно прийти, анализируя продолжительность импульса  $E_x(t)$  в пределах длины сближения  $l_{\text{пв}}$ :  $t_{\text{пв}} = \frac{l_{\text{пв}}}{c} = \frac{10 \dots 50}{3 \cdot 10^8} = 0,033 \dots 0,165$  мкс, что значительно меньше продолжительности импульса  $E_x(t)$   $t_{\text{и}} = 2$  мкс. Очевидно, что при  $t_{\text{пв}} \ll t_{\text{и}}$  в пределах сближения  $l_{\text{пв}}$  величина импульса  $E_x(t)$  действительно будет постоянной и примерно равной амплитуде  $E_x(\tau_{\text{ф}})$ . Из этого принципиального положения очевидно следствие: в пределах длины сближения  $l_{\text{пв}}$  импульс  $E_x(t)$  при  $\delta u(t) = \delta u(\tau_{\text{ф}})$  приближенно принимает максимальную величину и имеет размерность В/м, а действие его на вторичные цепи характеризуется зависимостью

$$E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}}) = E_x(\tau_{\text{ф}}) l_{\text{пв}}, \quad (22)$$

которая представляется прямоугольным конечным импульсом с крутым фронтом. Средняя погрешность приближения к (22) для  $\rho_3 = 50$  (100; 250; 500) Ом·м при  $l_{\text{пв}} = 50$  м составляет порядка  $\Delta = 1,5$  %. При  $l_{\text{пв}} < 50$  м и  $\rho_3 > 500$  Ом·м погрешность уменьшается.

В дальнейшем импульс  $E_{\text{пв}}(t) = E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}})$  будем считать падающей волной, которая при  $E_x(t) = E_x(\tau_{\text{ф}})$  с учетом (21) равна

$$E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi}) = 0,4 \frac{U_m}{Z_{вщ}} \delta u(t) l_{пв}, \quad t = \tau_{\phi}. \quad (23)$$

В общем случае на длине импульса  $\delta u(t)$   $\lambda_{и}$  фиксируется целое число  $n_{пв} = \frac{\lambda_{и}}{l_{пв}} = \frac{\tau_{\phi}}{t_{пв}}$  падающих волн  $E_{пв}(t)$  с различными амплитудами. Однако с целью оценки максимального уровня перенапряжений в качестве расчетной принимается падающая волна с максимальной амплитудой по (23). Обоснование падающей волны  $E_{пв}(\tau_{\phi})$  показано на рис. 2.

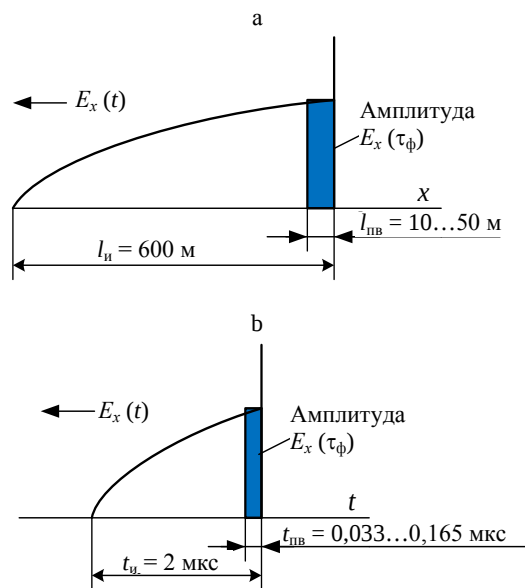


Рис. 2. К обоснованию падающей волны  $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi})$ :  
а – по длине импульса  $E_x(t)$ ; б – по продолжительности импульса  $E_x(t)$

Fig. 2. Towards the rationale of the incident wave  $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi})$ :  
а – according to the length of the impulse  $E_x(t)$ ; б – according to the duration of the impulse  $E_x(t)$

Замена  $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi})$  прямоугольным конечным импульсом полностью соответствует теории переходных процессов в цепях с распределенными параметрами, согласно которой при малой длине линии по сравнению с длиной волны даже в случае воздействующей синусоидальной ЭДС, имеющей частоту порядка десятков герц, за время пробега волны вдоль своей линии величина этой ЭДС может измениться лишь весьма незначительно, т. е. волны напряжения и токов приблизительно имеют прямоугольную форму [8]. Импульс  $\delta u(t)$  по рис. 1 условно может быть представлен четвертью периода синусоиды, которая более близка к прямоугольной форме, чем четверть синусоиды. Поэтому рассмотренное обоснование падающей волны  $E_{пв}(\tau_{\phi})$  вполне соответствует теории переходных процессов в линиях с распределенными параметрами.

Падающая волна  $E_{пв}(\tau_\phi)$ , как составная часть импульса  $E_x(t)$ , распространяясь по вторичным цепям, обуславливает импульсные помехи в УРЗА. Поскольку импульс  $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_\phi)$  определяется в момент времени  $t = \tau_\phi$ , то импульсные помехи имеют мгновенную величину  $u(t)_{пер} = u(\tau_\phi)_{пер}$ , что соответствует физической сущности импульсных помех.

### Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях

На подстанциях лотки с вторичными цепями, как правило, прокладываются параллельно и перпендикулярно шинам. Поэтому формирование падающей волны  $E_{пв}(\tau_\phi)$  (23) происходит только на длине параллельно сближению первичных цепей с вторичными цепями  $l_{пв}$  (в перпендикулярном направлении магнитное влияние считается нулевым). Для оценки максимального уровня перенапряжений рассмотрим случай, когда общестанционный пункт управления (ОПУ) расположен вблизи длины сближения  $l_{пв}$ , что позволяет не учитывать затухание волны  $E_{пв}(\tau_\phi)$  по длине вторичной цепи. Считается, что в ОПУ жила кабеля вторичных цепей заземляется на сопротивление нагрузки  $z_n$ . При распространении по кабелю падающая волна  $E_{пв}(\tau_\phi)$  отражается от нагрузки  $z_n$ , в результате чего на нагрузке появляется напряжение перенапряжений  $u(t)_{пер}$ , которое рассматривается как импульсная помеха для УРЗА.

Для процесса отражения волны прямоугольного конечного импульса  $E_{пв}(\tau_\phi)$  от нагрузки  $z_n$  рассматриваются две ее равные части:  $E_{пв1}(\tau_\phi) = E_{пв}(\tau_\phi)/2$  и  $E_{пв2}(\tau_\phi) = E_{пв}(\tau_\phi)/2$ . Отраженная волна равна  $E'_{пв1}(\tau_\phi) = E_{пв1}(\tau_\phi) \frac{z_n - z_{вк}}{z_n + z_{вк}}$ , где  $z_{вк}$  – волновое сопротивление кабеля, равное волновому сопротивлению жилы ( $z_{вк} = z_{вж}$ ). Отраженная волна  $E'_{пв1}(\tau_\phi)$  накладывается на подающую волну  $E_{пв2}(\tau_\phi)$ , в результате чего при  $E_{пв1}(\tau_\phi) = E_{пв2}(\tau_\phi)$  для суммарной волны будем иметь

$$E_{пв\Sigma}(\tau_\phi) = E_{пв1}(\tau_\phi) \left( \frac{z_n - z_{вк}}{z_n + z_{вк}} + 1 \right) = E_{пв1}(\tau_\phi) \frac{2z_n}{z_n + z_{вк}}. \quad (24)$$

Это выражение полностью совпадает с решением для отражения падающей волны в линиях электропередачи по [9], которое широко используется в электротехнике. Поскольку  $E_{пв1}(\tau_\phi) = E_{пв}(\tau_\phi)/2$ , то для перенапряжений  $u(t)_{пер}$  получим решение

$$u(t)_{пер} = 0,4 \frac{U_m}{z_{вж}} \delta u(\tau_\phi) l_{пв} \frac{z_n}{z_n + z_{вк}}, \quad t = \tau_\phi, \quad (25)$$

где  $\delta u(\tau_\phi)$  определяется по (18) при  $t = \tau_\phi$ .

Решение (25) справедливо только, когда сопротивление нагрузки  $z_n$  не зависит от частоты, т. е. сопротивление  $z_n$  является активным сопротивле-

нием. Это объясняется тем, что в случае зависимости нагрузки от частоты  $z_n(p)$  для решения  $u(t)_{\text{пер}}$  потребовалось бы использовать преобразование  $u(t)_{\text{пер}} = 0,4 \frac{U_m}{z_{\text{вн}}} \cdot \frac{\beta l_{\text{пв}}}{\tau_0 p(\sqrt{p} + \beta)} \cdot \frac{z_n(p)}{z_n(p) + z_{\text{вк}}}$ , что существенно усложнило бы задачу, рассматриваемую в статье. Именно поэтому прикладное применение решения возможно, когда вторичные цепи заземляются на активное сопротивление  $R_{\text{зк}}$ . В этом случае для решения (25) получим

$$u(t)_{\text{пер}} = 0,4 \frac{U_m}{z_{\text{вн}}} \delta u(\tau_{\text{ф}}) l_{\text{пв}} \alpha_{\text{сп}}, \quad t = \tau_{\text{ф}}, \quad (26)$$

где  $\alpha_{\text{сп}} = \frac{R_{\text{зк}}}{R_{\text{зк}} + z_{\text{вк}}} = \frac{1}{1 + z_{\text{вк}}/R_{\text{зк}}}$  – коэффициент снижения перенапряжений.

При  $R_{\text{зк}} = z_{\text{вк}}$  решение (26) принимает вид

$$u(t)_{\text{пер}} = 0,2 \frac{U_m}{z_{\text{вн}}} \delta u(\tau_{\text{ф}}) l_{\text{пв}}, \quad t = \tau_{\text{ф}}. \quad (27)$$

Заземление вторичных цепей на активное сопротивление  $R_{\text{зк}}$  можно осуществить путем выполнения заземляющего устройства (ЗУ) в ОПУ из системы вертикальных заземлителей, желательно из глубинных составных заземлителей длиной до 30 м [10]. Считается, что сопротивление горизонтальных связей между ЗУ ОПУ и ЗУ подстанции  $z_{\text{св}}$  вследствие высокочастотного спектра частот прямоугольного конечного импульса падающей волны  $E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}})$  имеет величину  $z_{\text{св}} \gg R_{\text{зк}}$ , что практически исключает стекание импульсных токов в землю через ЗУ подстанции.

Полученные решения (26) и (27) во временной области по физической сущности и структуре полностью соответствуют решениям для оценки влияния линий электропередачи на линии связи в частотной области, которые в общем случае с учетом  $E_x(j\omega)$  по (1) представляются в виде  $U(j\omega) = E_x(j\omega) l_{\text{пв}}$ .

Решения (26) и (27) по уровню перенапряжений определяют:

- при  $z_n > z_{\text{вк}}$  и  $R_{\text{зк}} > z_{\text{вк}}$  – предельно повышенный уровень перенапряжений, который на практике может не рассматриваться;
- при  $z_n < z_{\text{вк}}$  и  $R_{\text{зк}} < z_{\text{вк}}$  – пониженный уровень перенапряжений, соответствующий решению (26);
- при  $z_n = z_{\text{вк}}$  и  $R_{\text{зк}} = z_{\text{вк}}$  – средний повышенный уровень перенапряжений, который соответствует решению (27).

### Общие решения для перенапряжений во вторичных цепях

Рабочие решения (26) и (27) получены для случая размещения ОПУ вблизи длины сближения без учета затухания падающей волны  $E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}})$  по длине вторичных цепей. Для учета затухания волны  $E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}})$  представим вторич-

ные цепи длинной линией с погонными параметрами  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $G$  – соответственно индуктивность, емкость, активное сопротивление и проводимость изоляции жил и экрана. На практике информационные цепи стараются выбирать в виде линии без искажений при  $\frac{R}{L} = \frac{G}{C} = \delta$ , для которой падающая волна напряжения сохраняет свою форму, но распространяется со скоростью  $v = 1/\sqrt{LC}$  с затуханием амплитуды по экспоненте  $e^{-x\delta\sqrt{LC}}$ , где  $x$  – координата распространения волны  $E_{пв}(\tau_\phi)$  от длины сближения  $l_{пв}$  до удаленного ОПУ. Параметр  $\delta\sqrt{LC}$  равен:  $\frac{R}{L}\sqrt{LC} = R\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R}{z_{вк}}$ , где  $z_{вк} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

Падающая волна  $E_{пв}(\tau_\phi)$  представляется прямоугольным импульсом с длиной  $l_{пв}$  и амплитудой  $0,4 \frac{U_m}{z_{вш}} \delta u(\tau_\phi)$ . Форму такого импульса определяет длина импульса  $l_{пв}$ , поэтому при распространении падающей волны  $E_{пв}(\tau_\phi)$  по вторичным цепям ее форма остается постоянной, а вторичные цепи рассматриваются как линии без искажений. Тогда для падающей волны  $E_{пв}(\tau_\phi)$  будем иметь

$$E_{пв}(\tau_\phi) = 0,4 \frac{U_m}{z_{вш}} \delta u(\tau_\phi) l_{пв} e^{-\frac{xR}{z_{вк}}}. \quad (28)$$

С учетом (28) окончательно для рабочих решений (26) и (27) получим общие решения в виде:

- оценка пониженного уровня перенапряжений

$$u(t)_{пер} = 0,4 \frac{U_m}{z_{вш}} \delta u(\tau_\phi) l_{пв} \alpha_{сп} e^{-\frac{xR}{z_{вк}}}, \quad t = \tau_\phi; \quad (29)$$

- оценка среднего повышенного уровня перенапряжений

$$u(t)_{пер} = 0,2 \frac{U_m}{z_{вш}} \delta u(\tau_\phi) l_{пв} e^{-\frac{xR}{z_{вк}}}, \quad t = \tau_\phi. \quad (30)$$

Решения (26), (27) и (29), (30) получены при отражении падающей волны  $E_{пв}(t)$  по (23) от нагрузки  $z_n$  в конце вторичных цепей в ОПУ без учета последующих отражений волн от нагрузки в начале вторичных цепей в месте установки ОПН и разрядников. Это допущение объясняется тем, что последующая падающая волна по величине меньше первой падающей волны по (23). Наиболее просто такое положение можно обосновать для самого тяжелого случая, когда в начале вторичная цепь изолирована от земли.

В данном случае отраженная – падающая волна  $E'_{пв}(\tau_{\phi}) = \frac{E_{пв}(\tau_{\phi})}{2} \cdot \frac{z_{н} - z_{вк}}{z_{н} + z_{вк}}$  отражается без перемены знака, с учетом чего вторая падающая волна будет равна  $E_{пв}(t) = \frac{E_{пв}(\tau_{\phi})}{2} \cdot \frac{z_{н} - z_{вк}}{z_{н} + z_{вк}}$ , что меньше величины первой падающей волны  $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi})$  по (23). Поскольку переходный процесс вызывается одной начальной падающей волной  $E_{пв}(t)$ , возможность наложения падающей волны и отраженных волн исключается. Следовательно, для оценки максимального уровня перенапряжений действительно нужно принимать первую падающую волну по (23), как и сделано в статье.

### Результаты расчета уровня перенапряжений во вторичных цепях

Рассмотрим решения (26) и (27) применительно к набегающим грозовым волнам с линий на распределительные подстанции напряжением 110 и 220 кВ, которые на подходе к подстанциям по [4] имеют косугольный фронт и характеризуются кривой опасных волн. Кривая опасных волн с учетом вольт-секундной характеристики гирлянд изоляторов линии определяет область опасных волн для подстанции. При этом расчетный грозовой импульс напряжения имеет фронт  $\tau_{\phi} = 2$  мкс и максимальную амплитуду  $U_m$ , равную импульсному разрядному напряжению при положительной полярности и предразрядном времени  $\tau_{\phi} = 2$  мкс  $U_{\tau}^{+}$ , указанной в табл. 2.

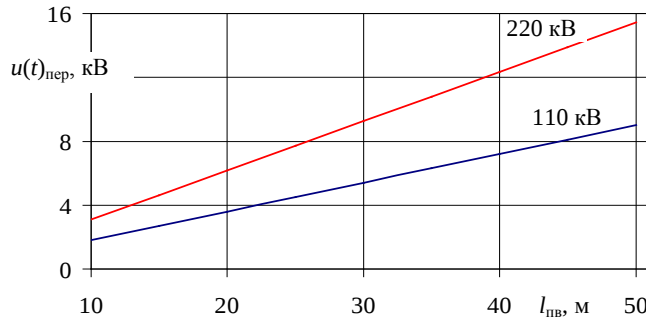
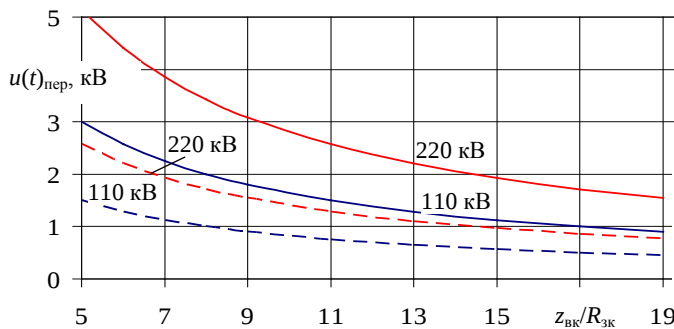
Таблица 2

Импульсное разрядное напряжение гирлянды на подстанциях  
Impulse discharge voltage of the string in the substations

|                                                            |      |      |
|------------------------------------------------------------|------|------|
| Номинальное напряжение подстанции $U_{ном}$ , кВ           | 110  | 220  |
| Амплитуда импульсного напряжения $U_m = U_{\tau}^{+}$ , кВ | 1050 | 1800 |

Решается следующая прикладная задача: оценка предельно возможного повышенного импульсного перенапряжения  $u(t)_{пер}$  для случая несрабатывания шинных ОПН и разрядников, когда грозовой импульс напряжения с фронтом  $\tau_{\phi} = 2$  мкс и амплитудой  $U_m = U_{\tau}^{+}$  распространяется по шинам без деформации по их длине. Вычислительный эксперимент для решений (26) и (27) выполним применительно к подстанциям 110, 220 кВ при исходных данных:  $h_{ш} = 5,5$  м;  $y = 0$ ;  $z_{вш} = 450$  Ом;  $l_{пв} = 10\text{--}50$  м;  $U_m = U_{\tau}^{+} = 1050; 1800$  кВ;  $\tau_{\phi} = 2$  мкс для земли со средним удельным сопротивлением  $\rho_3 = 100$  Ом·м, по которой в мировой научной практике часто оцениваются электрические расчеты с учетом протекания токов через землю.

Результаты расчета  $u(t)_{\text{пер}}$  представлены зависимостями  $u(t)_{\text{пер}} = f(l_{\text{пв}})$  и  $u(t)_{\text{пер}} = f\left(\frac{z_{\text{вк}}}{R_{\text{зк}}}\right)$ , которые показаны на рис. 3, 4. Для зависимостей  $u(t)_{\text{пер}} = f\left(\frac{z_{\text{вк}}}{R_{\text{зк}}}\right)$  приняты  $l_{\text{пв}} = 25; 50$  м с учетом  $\alpha_{\text{сп}} = \frac{1}{1 + z_{\text{вк}}/R_{\text{зк}}}$ .

Рис. 3. Зависимости  $u(t)_{\text{пер}} = f(l_{\text{пв}})$ Fig. 3. Dependences  $u(t)_{\text{пер}} = f(l_{\text{пв}})$ Рис. 4. Зависимости  $u(t)_{\text{пер}} = f(z_{\text{вк}}/R_{\text{зк}})$ :— для  $l_{\text{пв}} = 50$  м; - - - для  $l_{\text{пв}} = 25$  мFig. 4. Dependences  $u(t)_{\text{пер}} = f(z_{\text{вк}}/R_{\text{зк}})$ :— for  $l_{\text{пв}} = 50$  м; - - - for  $l_{\text{пв}} = 25$  м

Рассмотрены подстанции 110, 220 кВ с длиной шин  $l_{\text{пв}} = 10\text{--}50$  м. Очевидно, что для подстанции с  $l_{\text{пв}} > 50$  м расчетные уровни перенапряжений будут выше указанных на рис. 3, 4.

По физической сущности перенапряжения  $u(t)_{\text{пер}}$  происходят в системе «провод – земля», поэтому по классификации помех  $u(t)_{\text{пер}}$  можно отнести к помехам общего типа, напряжение которых приложено между заземленным на конструкции УРЗА проводником рассматриваемой вторичной цепи и удаленной землей, под которой понимается земля с нулевым потенциалом, расположенная вне зоны растекания импульсного тока с ЗУ ОПУ. По общей помехе можно определять помехи дифференциального типа «провод – провод» («жила – жила»), напряжение которых приложено между любыми двумя проводниками рассматриваемой вторичной цепи.

Если перенапряжения  $u(t)_{\text{пер}}$  по (26), (27) и (29), (30) считать помехами, то эти помехи представляют опасность в части возможного электрического повреждения УРЗА, т. е. являются опасными помехами. Помехи дифференциального типа «жила – жила» связаны с функционированием УРЗА и считаются мешающими помехами. Проблема мешающего влияния наиболее просто решается путем применения экранированных кабелей вторичных цепей.

По [10] выбор кабелей вторичных цепей производится отдельно для трансформаторов напряжения и трансформаторов тока:

- измерительные цепи от трансформаторов напряжения до панелей технических средств (ТС) должны выполняться кабелями с металлической оболочкой или с металлической оболочкой и броней;
- измерительные цепи от трансформаторов тока до панелей ТС следует выполнять экранированными контрольными кабелями, кабелями с оболочкой или кабелями с оболочкой и броней.

Для таких измерительных цепей устанавливаются нормируемые расчетные значения напряжения помех в точках подключения ТС:

- помехи, обусловленные прорывом грозовых волн с ВЛ на высоковольтные шины электроустановки:  $u(t)_{\text{доп}} = 1,5 \text{ кВ}$ ;
- помехи, обусловленные коммутацией высоковольтного оборудования:  $u(t)_{\text{доп}} = 1,5 \text{ кВ}$ .

Приведенные нормы для грозовых и коммутационных помех  $u(t)_{\text{доп}} = 1,5 \text{ кВ}$  разработаны ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект» совместно с его белорусским отделением еще до распада СССР. Опыт эксплуатации подстанций, выполненных с учетом указанных норм на средства УРЗА, до настоящего времени вполне положительный.

При сопоставлении расчетных величин перенапряжений во вторичных цепях по рис. 3 с нормированными величинами  $u(t)_{\text{доп}} = 1,5 \text{ кВ}$  очевидно, что режим несрабатывания ОПН и разрядников представляет большую опасность в отношении возможного электрического повреждения элементов УРЗА. Для подстанций 110, 220 кВ снизить указанную опасность можно путем использования локального заземления вторичных цепей через сопротивление  $R_3$  (рис. 4).

## ВЫВОД

Разработан метод расчета импульсного магнитного влияния первичных цепей на вторичные цепи подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения для случая несрабатывания ограничителей перенапряжений и разрядников, который на стадии проектирования и эксплуатации подстанций может использоваться как тестовый метод для оценки электрической стойкости устройств релейной защиты и автоматики от грозовых и коммутационных перенапряжений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко, М. В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М. В. Костенко, Л. С. Перельман, Ю. П. Шкарин. М.: Энергия, 1973. 272 с.
2. Глушко, В. И. К решению классической задачи магнитного влияния воздушных линий электропередачи на протяженные проводящие коммуникации / В. И. Глушко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 2. С. 5–10.
3. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. М.: Наука, 1971. 1108 с.
4. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных линиях электропередачи высокого напряжения / М. В. Костенко и [и др.]. Л.: Наука, 1988. 302 с.
5. Глушко, В. И. Расчет импульсных помех во вторичных цепях подстанций высокого напряжения / В. И. Глушко // Электричество. 1989. № 4. С. 23–32.
6. Справочник по специальным функциям / под ред. А. Абрамовица [и др.]. М.: Наука, 1979. 832 с.
7. Герасимович, Д. А. Математическое моделирование импульсных характеристик вертикальных стержневых заземлителей / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 9–16.
8. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники: в 2 т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1981. Т. 2. 416 с.
9. Круг, К. А. Основы электротехники. Т. 2 / К. А. Круг. М.; Л.: Гос. энерг. изд-во, 1932. 949 с.
10. Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ от электромагнитных влияний и грозовых воздействий: СТП 09110.47.104–08. Введ. 17.09.2010. Минск: ГПО «Белэнерго», 2010. 64 с.

Поступила 04.07.2016 Подписана в печать 06.09.2016 Опубликовано онлайн 30.05.2017

## REFERENCES

1. Kostenko M. V., Perelman L. S., Shkarin Yu. P. (1973) *Wave Processes and Electrical Interference in Multi-Wire Power Lines*. Moscow, Energiya Publ. 272 (in Russian).
2. Glushko V. (2013) To Solution of Classical Problem Pertaining to Magnetic Interference of Overhead Power Transmission Line on Extended Conducting Communications. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 5–10 (in Russian).
3. Gradshtein I. S., Ryzhik I. M. (1971) *Tables of Integrals, Sums, Series, and Products*. Moscow, Nauka Publ. 1108 (in Russian).
4. Kostenko M. V., Kadomskaya K. P., Levinstein M. L., Efremov I. A., Tikhodeev N. N. (1988) *Overvoltage and Overvoltage Protection to Overhead and Cable Transmission Lines with High Voltage*. Leningrad, Nauka Publ. 302 (in Russian).
5. Glushko V. I. (1989) Calculation of Impulse Noise in the Secondary Circuits of High-Voltage Substations. *Elektrichestvo [Electricity]*, (4), 23–32 (in Russian).
6. Abramovits M., Stigant I. (1964) *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. Washington, National Bureau of Standards. 1060.
7. Gerasimovich D., Dzhurhina A. (2012) Mathematical Simulation of Transient Parameters of Vertical Grounding Electrodes. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 9–16 (in Russian).
8. Neyman L. R., Demirchyan K. S. (1981) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. Vol. 2. 3<sup>rd</sup> ed. Leningrad, Energoizdat Publ. 416 (in Russian).
9. Krug K. A. (1932) *Foundations of Electrical Engineering*. Vol. 2. Moscow-Leningrad, State Energy Publishing House. 949 (in Russian).
10. Enterprise Standard 09110.47.104–08 (2010). Guidelines for the Protection of Secondary Circuits of Power Stations and Substations of 35–750 kW from Electromagnetic Effects and Lightning Effects. Minsk, State Production Association “Belenergo”. 64 (in Russian).

Received: 4 July 2016

Accepted: 6 September 2016

Published online: 30 May 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-228-236

УДК 621.311

## Исследование переходных и стационарных режимов синхронной двухмашинной системы

В. С. Сафарян<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики» (Ереван, Республика Армения)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Решение задачи обеспечения надежной работы электроэнергетической системы в стационарных и переходных режимах, предотвращения перехода в асинхронный режим, сохранения и восстановления устойчивости послеаварийных процессов основывается на формировании и реализации математических моделей процессов такой системы. При работе электроэнергетической системы в асинхронном режиме, помимо основных частот, в состав токов и напряжений входят гармонические составляющие, частоты которых кратны разности основных частот. При двухчастотном асинхронном режиме система эквивалентизируется в виде двухмашинной системы, работающей на обобщенную нагрузку. В статье приведены математические модели переходного процесса двухмашинной системы в натуральной форме и в системе координат  $d-q$ . Рассмотрена математическая модель двухмашинной системы при наличии у роторов двух обмоток возбуждения, показаны разновидности математических моделей (тривиальная, упрощенная, полная) переходных процессов электроэнергетической системы. Переходный процесс синхронной двухмашинной системы описывается полной моделью. Качество переходных процессов синхронной машины зависит от числа обмоток возбуждения ротора. При наличии двух обмоток возбуждения на роторе (дуальная система возбуждения) математическая модель электромагнитных переходных процессов синхронной машины представляется в комплектной форме, т. е. в системе координат  $d, q$ , а ток ротора – обобщенным вектором. При асинхронном ходе в синхронной двухмашинной системе при наличии двух обмоток возбуждения на роторе системы токов и напряжений содержат гармоники только двух частот. Приведена математическая модель синхронного стационарного процесса синхронной двухмашинной системы и рассмотрены стационарные режимы при различной структуре задания исходной информации.

**Ключевые слова:** математическая модель, асинхронный режим, двухмашинная система, переходный процесс, двухчастотный режим, обобщенная нагрузка, стационарный режим

**Для цитирования:** Сафарян, В. С. Исследование переходных и стационарных режимов синхронной двухмашинной системы / В. С. Сафарян // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 3. С. 228–236. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-228-236

---

### Адрес для переписки

Сафарян Виталий Сафарович  
ЗАО «Научно-исследовательский институт  
энергетики»  
просп. Мясникяна, 5/1,  
0025, г. Ереван, Республика Армения  
Тел.: +374 010 559-659  
liliasafar@rambler.ru

### Address for correspondence

Safaryan Vitali S.  
CJSC Scientific Research Institute  
of Energy  
5/1 Myasnikyan Ave.,  
0025, Yerevan, Republic of Armenia  
Tel.: +374 010 559-659  
liliasafar@rambler.ru

---

## Study of Transient and Stationary Operation Modes of Synchronous System Consisting in Two Machines

V. S. Safaryan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Closed Joint-Stock Company (CJSC) Scientific Research Institute of Energy (Yerevan, Republic of Armenia)

**Abstract.** The solution of the problem of reliable functioning of an electric power system (EPS) in steady-state and transient regimes, prevention of EPS transition into asynchronous regime, maintenance and restoration of stability of post-emergency processes is based on formation and realization of mathematical models of an EPS processes. During the functioning of electric power system in asynchronous regime, besides the main frequencies, the currents and voltages include harmonic components, the frequencies of which are multiple of the difference of main frequencies. At the two-frequency asynchronous regime the electric power system is being made equivalent in a form of a two-machine system, functioning for a generalized load. In the article mathematical models of transient process of a two-machine system in natural form and in  $d$ - $q$  coordinate system are presented. The mathematical model of two-machine system is considered in case of two windings of excitement at the rotors. Also, in the article varieties of mathematical models of EPS transient regimes (trivial, simple, complete) are presented. Transient process of a synchronous two-machine system is described by the complete model. The quality of transient processes of a synchronous machine depends on the number of rotor excitation windings. When there are two excitation windings on the rotor (dual system of excitation), the mathematical model of electromagnetic transient processes of a synchronous machine is represented in a complex form, i.e. in coordinate system  $d$ ,  $q$ , the current of rotor being represented by a generalized vector. In asynchronous operation of a synchronous two-machine system with two excitation windings on the rotor the current and voltage systems include only harmonics of two frequencies. The mathematical model of synchronous steady-state process of a two-machine system is also provided, and the steady-state regimes with different structures of initial information are considered.

**Keywords:** mathematical model, asynchronous regime, two-machine system, transient process, dual frequency mode, generalized load, stationary mode

**For citation:** Safaryan V. S. (2017) Study of Transient and Stationary Operation Modes of Synchronous System Consisting in Two Machines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 228–236. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-228-236 (in Russian)

### Введение

Математические модели переходных процессов можно разделить на три категории:

а) тривиальная модель – учитываются только электромеханические переходные процессы синхронных и асинхронных машин [1, 2], электромагнитные переходные процессы в контурах ротора и статора машин, а также в электрической сети не учитываются;

б) упрощенная модель – учитываются электромеханические и электромагнитные переходные процессы в электрических машинах, а электрическая сеть представляется моделью установившегося (стационарного) режима [1, 3–10];

в) полная модель – электрические машины представляются электромеханической и электромагнитной моделями, а электрическая сеть, в отличие от упрощенной модели, также представляется моделью переходного процесса.

Для исследования и анализа переходных процессов современных электроэнергетических систем используется упрощенная модель, поскольку применение полной модели приводит к увеличению размерности системы нелинейных дифференциальных уравнений переходных процессов. Качество переходных процессов синхронной двухмашинной системы (СДС) зависит от числа обмоток возбуждения роторов [4, 6].

При асинхронном режиме в электрической системе наблюдаются колебания всех режимных параметров синхронных генераторов, вызванные влиянием асинхронно работающих машин друг на друга. В этом случае в состав токов и напряжений генераторов будут входить составляющие, соответствующие основным частотам асинхронного хода, которые являются определяющими для рассматриваемого процесса [1]. При построении математической модели синхронного генератора принято допущение о том, что токи и напряжения складываются из двух частотных составляющих, соответствующих средним скоростям вращения роторов асинхронно идущих машин [1].

Цель работы – формирование и исследование полной математической модели переходного и стационарного режимов двухмашинной системы.

### Результаты исследования

При возникновении двухчастотного асинхронного режима синхронные машины разделяются на две асинхронно работающие группы, а электрическая система – на две подсистемы. То есть для исследования двухчастотных режимов ЭЭС моделируется эквивалентной двухмашинной системой с обобщенной нагрузкой [1] (рис. 1).

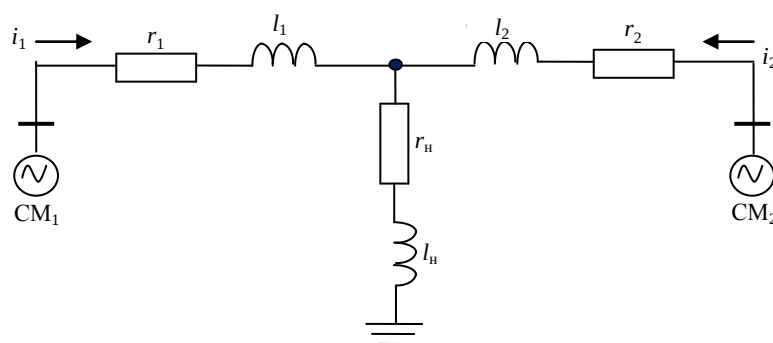


Рис. 1. Синхронная двухмашинная система: CM<sub>1</sub>, CM<sub>2</sub> – синхронная машина;

$i_1$  ( $i_{1a}$ ,  $i_{1b}$ ,  $i_{1c}$ ),  $i_2$  ( $i_{2a}$ ,  $i_{2b}$ ,  $i_{2c}$ ) – трехфазный ток статора синхронной машины;

$r_1$ ,  $l_1$  ( $r_2$ ,  $l_2$ ) – активное сопротивление и индуктивность линии;

$r_n$ ,  $l_n$  – активное сопротивление и индуктивность нагрузки

Fig. 1. Synchronous two-machine system: CM<sub>1</sub>, CM<sub>2</sub> – synchronous machine;

$i_1$  ( $i_{1a}$ ,  $i_{1b}$ ,  $i_{1c}$ ),  $i_2$  ( $i_{2a}$ ,  $i_{2b}$ ,  $i_{2c}$ ) – three-phased current of stator of synchronous machine;

$r_1$ ,  $l_1$  ( $r_2$ ,  $l_2$ ) – resistance and inductance of the line;  $r_n$ ,  $l_n$  – resistance and inductance of the load

Составим систему дифференциальных уравнений переходных процессов СДС:

$$\begin{cases}
R_1 i_{a1} + L_1 \frac{di_{a1}}{dt} + M_1 \left[ \frac{di_{r1}}{dt} \cos \alpha_1 - \omega_1 i_{r1} \sin \alpha_1 \right] = -u_{a1}; \\
R_1 i_{b1} + L_1 \frac{di_{b1}}{dt} + M_1 \left[ \frac{di_{r1}}{dt} \cos(\alpha_1 - \rho) - \omega_1 i_{r1} \sin(\alpha_1 - \rho) \right] = -u_{b1}; \\
R_1 i_{c1} + L_1 \frac{di_{c1}}{dt} + M_1 \left[ \frac{di_{r1}}{dt} \cos(\alpha_1 + \rho) - \omega_1 i_{r1} \sin(\alpha_1 + \rho) \right] = -u_{c1}; \\
r_1 i_{r1} + l_{r1} \frac{di_{r1}}{dt} + M_1 \left[ \frac{di_{a1}}{dt} \cos \alpha_1 - \omega_1 i_{a1} \sin \alpha_1 + \frac{di_{b1}}{dt} \cos(\alpha_1 - \rho) - \right. \\
\left. - \omega_1 i_{b1} \sin(\alpha_1 - \rho) + \frac{di_{c1}}{dt} \cos(\alpha_1 + \rho) - \omega_1 i_{c1} \sin(\alpha_1 + \rho) \right] = e_{r1}; \\
J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{s1} + M_{m1};
\end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases}
R_2 i_{a2} + L_2 \frac{di_{a2}}{dt} + M_2 \left[ \frac{di_{r2}}{dt} \cos \alpha_2 - \omega_2 i_{r2} \sin \alpha_2 \right] = -u_{a2}; \\
R_2 i_{b2} + L_2 \frac{di_{b2}}{dt} + M_2 \left[ \frac{di_{r2}}{dt} \cos(\alpha_2 - \rho) - \omega_2 i_{r2} \sin(\alpha_2 - \rho) \right] = -u_{b2}; \\
R_2 i_{c2} + L_2 \frac{di_{c2}}{dt} + M_2 \left[ \frac{di_{r2}}{dt} \cos(\alpha_2 + \rho) - \omega_2 i_{r2} \sin(\alpha_2 + \rho) \right] = -u_{c2}; \\
r_2 i_{r2} + l_{r2} \frac{di_{r2}}{dt} + M_2 \left[ \frac{di_{a2}}{dt} \cos \alpha_2 - \omega_2 i_{a2} \sin \alpha_2 + \frac{di_{b2}}{dt} \cos(\alpha_2 - \rho) - \right. \\
\left. - \omega_2 i_{b2} \sin(\alpha_2 - \rho) + \frac{di_{c2}}{dt} \cos(\alpha_2 + \rho) - \omega_2 i_{c2} \sin(\alpha_2 + \rho) \right] = e_{r2}; \\
J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{s2} + M_{m2},
\end{cases} \quad (2)$$

где  $R_1 = r_1 + R_{S1}$  ( $R_2 = r_2 + R_{S2}$ ),  $R_{S1}$  ( $R_{S2}$ ) – активное сопротивление статора;  $L_1 = l_1 + L_{S1}$  ( $L_2 = l_2 + L_{S2}$ ),  $L_{S1}$  ( $L_{S2}$ ) – индуктивность рассеяния статора;  $M_1$  ( $M_2$ ) – взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора при их параллельном расположении;  $i_{r1}$  ( $i_{r2}$ ) – ток ротора;

$a_1 = a_{10} + \int_0^t \omega_1 dt$   $\left( a_2 = a_{20} + \int_0^t \omega_2 dt \right)$  – комплексная константа;  $\omega_1$  ( $\omega_2$ ) – уг-

ловая скорость ротора;  $J_1$  ( $J_2$ ) – момент инерции ротора;  $e_{r1}$  ( $e_{r2}$ ) – электродвижущая сила обмотки возбуждения;  $M_{m1}$  ( $M_{m2}$ ) – механический момент, приложенный к валу ротора;  $\rho = 120^\circ$ ;  $M_{s1}$  ( $M_{s2}$ ) – электромагнитный момент.

$$\begin{cases} M_{31} = -M_1 i_{r1} [i_{a1} \sin \alpha_1 + i_{b1} \sin(\alpha_1 - \rho) + i_{c1} \sin(\alpha_1 + \rho)]; \\ M_{32} = -M_2 i_{r2} [i_{a2} \sin \alpha_2 + i_{b2} \sin(\alpha_2 - \rho) + i_{c2} \sin(\alpha_2 + \rho)]. \end{cases} \quad (3)$$

Правые части систем (1), (2) определяются по формулам:

$$\begin{cases} u_{a1} = u_{a2} = u_a = r_h (i_{a1} + i_{a2}) + L_h \frac{d}{dt} (i_{a1} + i_{a2}); \\ u_{b1} = u_{b2} = u_b = r_h (i_{b1} + i_{b2}) + L_h \frac{d}{dt} (i_{b1} + i_{b2}); \\ u_{c1} = u_{c2} = u_c = r_h (i_{c1} + i_{c2}) + L_h \frac{d}{dt} (i_{c1} + i_{c2}). \end{cases} \quad (4)$$

Представим (1) и (2) обобщенными векторами в системах координат, вращающихся с угловыми скоростями  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$\begin{cases} (Z_1 + pL_1)\dot{I}_1 + j(p + j\omega_1)M_1 i_{r1} = -[r_h + (p + j\omega_1)L_h]\dot{I}_1 - \\ -[r_h + (p + j\omega_2)L_h]\dot{I}_2 e^{j\delta}; \\ 1,5pM_1 I_{d1} + (r_{r1} + pL_{r1}) = e_{r1}; \\ J_1 p\omega_1 = -1,5M_1 i_{r1} I_{q1} + M_{m1}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} (Z_2 + pL_2)\dot{I}_2 + j(p + j\omega_2)M_2 i_{r2} = -[r_h + (p + j\omega_2)L_h]\dot{I}_2 - \\ -[r_h + (p + j\omega_1)L_h]\dot{I}_1 e^{j\delta}; \\ 1,5pM_2 I_{d2} + (r_{r2} + pL_{r2}) = e_{r2}; \\ J_2 p\omega_2 = -1,5M_2 i_{r2} I_{q2} + M_{m2}. \end{cases} \quad (6)$$

где  $Z_1 = R_1 + j\omega_1 L_1$ ;  $Z_2 = R_2 + j\omega_2 L_2$ ;  $\dot{I}_1 = I_{q1} + jI_{d1}$ ;  $\dot{I}_2 = I_{q2} + jI_{d2}$ ;  
 $p = \frac{d}{dt}$ .

Перенеся первые слагаемые правой части в системах (5), (6), получим:

$$\begin{cases} (Z_{h1} + Z_1 + pL_1)\dot{I}_1 + j(p + j\omega_1)M_1 i_{r1} = -[Z_{h2} + pL_h]\dot{I}_2 e^{j\delta}; \\ 1,5pM_1 I_{d1} + (r_{r1} + pL_{r1})i_{r1} = e_{r1}; \\ J_1 p\omega_1 = -1,5M_1 i_{r1} i_{q1} + M_{m1}; \\ (Z_{h2} + Z_2 + pL_2)\dot{I}_2 + j(p + j\omega_2)M_2 i_{r2} = -[Z_{h1} + pL_h]\dot{I}_1 e^{-j\delta}; \\ 1,5pM_2 I_{d2} + (r_{r2} + pL_{r2})i_{r2} = e_{r2}; \\ J_2 p\omega_2 = -1,5M_2 i_{r2} i_{q2} + M_{m2}. \end{cases} \quad (7)$$

где  $Z_{h1} = r_h + j\omega_1 L_h$ ;  $Z_{h2} = r_h + j\omega_2 L_h$ ;  $\delta = \alpha_2 - \alpha_1$ .

Система (7) описывает нестационарные, в общем случае – несинхронные (асинхронные) процессы СДС (искомыми являются  $\dot{I}_1$ ,  $i_{r1}$ ,  $\omega_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $i_{r2}$ ,  $\omega_2$ ).

Синхронный процесс ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ) СДС описывается стационарной системой уравнений, в которой режимные параметры не зависят от времени. Математическая модель синхронного ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ) стационарного ( $p = 0$ ) процесса СДС имеет следующий вид:

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_H)\dot{I}_1 + Z_H\dot{I}_2 e^{j\delta} = \omega M_1 i_{r1}; \\ Z_H\dot{I}_1 e^{-j\delta} + (Z_2 + Z_H)\dot{I}_2 = \omega M_2 i_{r2}; \\ r_{r1} i_{r1} = e_{r1}; \\ r_{r2} i_{r2} = e_{r2}; \\ 1,5 M_1 i_{r1} i_{q1} = M_{m1}; \\ 1,5 M_2 i_{r2} i_{q2} = M_{m2}. \end{cases} \quad (8)$$

Преобразуя первые два комплексных уравнения системы (8), получим:

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_H)\dot{I}_1 + Z_H\dot{I}_2 e^{j\delta} = E_1; \\ Z_H\dot{I}_1 + (Z_2 + Z_H)\dot{I}_2 e^{j\delta} = E_2 e^{j\delta}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $E_1 = \omega M_1 i_{r1}$ ;  $E_2 = \omega M_2 i_{r2}$ .

Системе уравнений соответствует сеть, схема которой представлена на рис. 2.

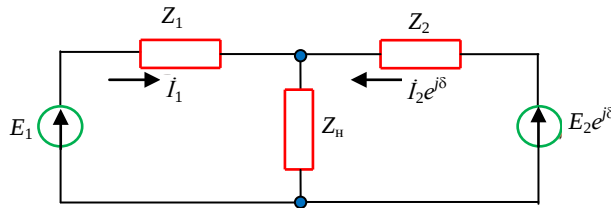


Рис. 2. Схема замещения синхронной двухмашинной системы в синхронном стационарном режиме

Fig. 2. Equivalent circuit of synchronous two-machine system in synchronous steady state regime

Рассмотрим синхронный стационарный режим при различных постановках задачи. Примем, что конструктивные параметры СДС (активные сопротивления и индуктивности синхронных машин, линий и нагрузки, взаимные индуктивности, моменты инерции) заданы. При различной структуре задания внешних параметров СДС ( $e_{r1}$ ,  $e_{r2}$ ,  $M_{m1}$ ,  $M_{m2}$ ) рассмотрим режимные параметры ( $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$ ,  $\omega$ ,  $\delta$ ), воспользовавшись математической моделью (8).

1. Заданными являются:  $e_{r1}$ ,  $e_{r2}$ ,  $\delta$ ,  $\omega$ , искомыми –  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$ ,  $M_{m1}$ ,  $M_{m2}$ .

Определяем  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$  непосредственно из третьего и четвертого уравнений системы (8):

$$i_{r1} = \frac{e_{r1}}{r_{r1}}; i_{r2} = \frac{e_{r2}}{r_{r2}}.$$

Находим  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  совместным решением первых двух уравнений системы (8):

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = [E_1(Z_2 + Z_H) - E_2 Z_H e^{j\delta}] / \Delta; \\ \dot{I}_2 = [E_2(Z_1 + Z_H) - E_1 Z_H e^{j\delta}] / \Delta, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\Delta = (Z_1 + Z_H)(Z_2 + Z_H) - Z_H^2 = Z_1 Z_2 + Z_H(Z_1 + Z_2)$ .

Параметры  $M_{m1}, M_{m2}$  определяем из последних двух уравнений (8). Зависимости комплексных токов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  (10) от  $\delta \in [0, 2\pi]$  выражаются дробно-линейной функцией комплексной переменной и изображаются окружностью (рис. 3а). График зависимости механических моментов  $M_{m1}, M_{m2}$  от параметра  $\delta \in [0, 2\pi]$  имеет вид эллипса, представленного на рис. 3б.

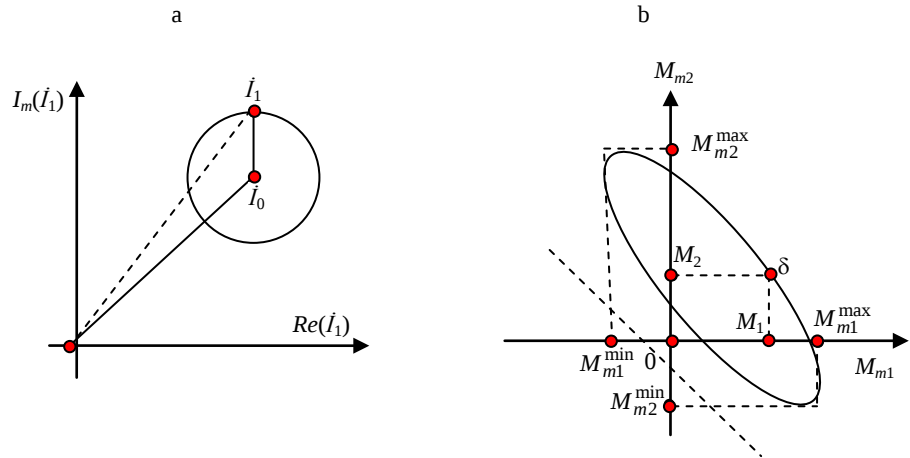


Рис. 3. Графики зависимостей  $\dot{I}_1(\delta)$  (а) и  $M_{m1}(\delta), M_{m2}(\delta)$  (б)

Fig. 3. Dependence curves:  $\dot{I}_1(\delta)$  (a) and  $M_{m1}(\delta), M_{m2}(\delta)$  (b)

На рис. 3а  $\dot{I}_0 = \frac{E_1(Z_2 + Z_H)}{\Delta}$ , а радиус окружности равен  $E_1 \frac{|Z_H|}{|\Delta|}$ . График

эллипса на рис. 3б расположен выше прямой  $M_{m1} + M_{m2} = 0$ . Поставленная задача имеет единственное решение.

2. Заданными являются:  $e_{r1}, e_{r2}, M_{m1}, M_{m2}$ , искомыми –  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, i_{r1}, i_{r2}, \delta, \omega$ .

Определяем  $i_{r1}, i_{r2}$  непосредственно из третьего и четвертого выражений системы (8). Из последних двух уравнений (8) находим  $i_{d1}, i_{d2}, \omega, \delta$ , сведя к решению нелинейных трансцендентных уравнений. В отличие от

предыдущей постановки, решение задачи может не существовать или задача может иметь несколько решений, у которых  $e_{r1}$ ,  $e_{r2}$ ,  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$  одинаковые.

При асинхронном движении ( $\omega_1 \neq \omega_2$ ) СДС образуется лавина частот, содержащая  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $k(\omega_1 - \omega_2)$ , где  $k$  – целое число, а токи, напряжения, электромагнитный момент получаются несинусоидальными. Покажем, что при наличии на роторах синхронных машин двух обмоток возбуждения при асинхронном движении СДС токи и напряжения содержат гармоники только двух частот ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ). Математическая модель переходного электромагнитного процесса при наличии на роторах двух обмоток возбуждения имеет следующий вид:

$$\begin{cases} (Z_{n1} + Z_1 + pL_1)\dot{I}_1 + j(p + j\omega_1)M_1\dot{I}_{r1} = -(Z_{n2} + pL_n)\dot{I}_2 e^{j\delta}; \\ 1,5pM_1\dot{I}_1 + (r_{r1} + pl_{r1})\dot{I}_{r1} = \dot{e}_{r1}; \\ (Z_{n2} + Z_2 + pL_2)\dot{I}_2 + j(p + j\omega_2)M_2\dot{I}_{r2} = -(Z_{n1} + pL_n)\dot{I}_1 e^{-j\delta}; \\ 1,5pM_2\dot{I}_2 + (r_{r2} + pl_{r2})\dot{I}_{r2} = \dot{e}_{r2}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\dot{I}_{r1}$  ( $\dot{I}_{r2}$ ) – комплексный ток ротора, компонентами которого являются токи по осям  $d$ ,  $q$ ;  $\dot{e}_{r1}$  ( $\dot{e}_{r2}$ ) – комплексная ЭДС возбуждения ротора, компонентами которой являются ЭДС по осям  $d$ ,  $q$ .

Предполагаем, что токи статоров и роторов СДС меняются по следующим законам:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = a_1 + b_1 e^{j\delta}; \\ \dot{I}_2 = a_2 + b_2 e^{-j\delta}; \\ \dot{I}_{r1} = c_1 + d_1 e^{j\delta}; \\ \dot{I}_{r2} = c_2 + d_2 e^{-j\delta}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$  – комплексные константы.

Непосредственной подстановкой выражений токов (12) в (11) убеждаемся, что они удовлетворяют системе (11).

### ВЫВОДЫ

1. Получены математические модели переходных процессов синхронной двухмашинной системы в натуральной форме и в системе координат  $d, q$ .

2. Исследован стационарный процесс синхронной двухмашинной системы при различных способах задания независимой информации.

3. В асинхронных режимах синхронной двухмашинной системы образуется лавина частот, которая содержит гармоники частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $k(\omega_1 - \omega_2)$ , где  $k$  – целое число.

4. При наличии на роторах синхронных машин двух обмоток возбуждения при асинхронном движении синхронной двухмашинной системы токи и напряжения содержат гармоники только двух частот ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Наровлянский, В. Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы / В. Г. Наровлянский. М.: Энергоатомиздат, 2004. 360 с.
2. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.
3. Горев, А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. М.: Госэнергоиздат, 1960. 551 с.
4. Арешян, Г. Л. Специальные вопросы теории электрических машин переменного тока / Г. Л. Арешян. Ереван, 1999. 300 с.
5. Наровлянский, В. Г. Метод определения эквивалентных параметров схемы замещения энергосистемы в асинхронном режиме / В. Г. Наровлянский, А. А. Налевин // Электричество. 2005. № 8. С. 15–21.
6. Пирматов, Н. Б. Исследование работы синхронного двигателя с возбуждением по продольной и поперечной осям при ударной нагрузке / Н. Б. Пирматов, М. Г. Ахматов, Н. К. Катаров // Электричество. 2003. № 2. С. 64–65.
7. Якимец, И. В. Определение эквивалентных параметров энергосистемы для адаптивного функционирования противоаварийной автоматики / И. В. Якимец, Г. А. Дмитриева, А. А. Налевин // Электричество. 2003. № 7. С. 2–9.
8. Гоник, Я. Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима / Я. Е. Гоник, Е. С. Иглицкий. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 111.
9. Бринкис, К. А. Микропроцессорное устройство предотвращения асинхронного хода / К. А. Бринкис, Г. И. Бочарева, А. С. Саухатас // Электричество. 1990. № 2. С. 36–38.
10. Якимец, И. В. Обобщенные способы выявления асинхронного режима энергосистемы / И. В. Якимец, И. З. Глускин, В. Г. Наровлянский // Электричество. 1997. № 11. С. 9–15.

Поступила 15.04.2016 Подписана в печать 27.06.2016 Опубликовано онлайн 30.05.2017

## REFERENCES

1. Narovlyansky V. G. (2004) *Modern Methods and Means of Prevention of Asynchronous Operation of the Power Grid*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 360 (in Russian).
2. Venikov V. A. (1985) *Transient Electromechanical Processes in Electrical Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola. 536 (in Russian).
3. Gorev A. A. (1960) *Transients of the Synchronous Machine*. Moscow, Gosenergoizdat. 551 (in Russian).
4. Areshian G. L. (1999) *Special Issues of Theory of Alternating Current Electric Machines*. Yerevan. 300 (in Russian).
5. Narovlyansky V. G., Nalyevin A. A. (2005) Method of Determining Equivalent Parameters of the Equivalent Circuit of the Power Grid in Asynchronous Mode. *Elektrichestvo* [Electricity], (8), 15–21 (in Russian).
6. Pirmatov N. B., Akhmatov M. G., Katalov N. K. (2003) The Study of the Synchronous Motor with Excitation by Longitudinal and Transverse Axes Under Shock Load. *Elektrichestvo* [Electricity], (2), 64–65 (in Russian).
7. Yakimets I. V., Dmitriyeva G. A., Nalyevin A. A. (2003) Determination of Equivalent Parameters of Power System for Adaptive Operation of Emergency Automatic Control. *Elektrichestvo* [Electricity], (7), 2–9 (in Russian).
8. Gonik Ya. E., Iglitskiy Ye. S. (1988) *Automatic Elimination of Asynchronous Mode*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 111 (in Russian).
9. Brinkis K. A., Bochkareva G. I., Saukhata A. S. (1990) Microprocessor Device for Preventing Asynchronous Course. *Elektrichestvo* [Electricity], (2), 36–38 (in Russian).
10. Yakimets I. V., Gluskin I. Z., Narovlyansky V. G. (1997) Generalized Methods for Detection of the Asynchronous Mode of the Power System. *Elektrichestvo* [Electricity], (11), 9–15 (in Russian).

Received: 15 April 2016

Accepted: 27 June 2016

Published online: 30 May 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-237-255

УДК 536.24

## Методика расчета и анализ коэффициента теплопередачи биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения с неравномерным внешним загрязнением

В. В. Дударев<sup>1)</sup>, С. О. Филатов<sup>1)</sup>, Т. Б. Карлович<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Рассмотрена новая методика расчета коэффициента теплопередачи биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения с учетом внешнего эксплуатационного загрязнения. В отличие от общеизвестных методик, использующих допущение о равномерном распределении слоя эксплуатационного загрязнения с постоянной толщиной по всей поверхности оребрения, в данной методике предполагается, что толщина слоя загрязнения при длительной эксплуатации изменяется неравномерно. При этом толщина слоя загрязнения у основания ребер со временем становится значительно больше, чем на остальной части ребристой поверхности. В основе методики лежит математическая модель, разработанная с использованием метода электротепловой аналогии, согласно которому тепловой поток через стенку ребристой трубы рассматривается условно разделенным на две составляющие: через кольцевой слой внешнего загрязнения, прилегающий к основанию ребер, и через оставшуюся часть внешней ребристой поверхности, покрытую тонким слоем загрязнения. В рамках разработанной методики создан новый способ определения термического сопротивления слоя загрязнения, который базируется на аналитическом решении двухмерной задачи теплопроводности в кольцевом слое. С помощью данной методики для промышленно изготавливаемой биметаллической ребристой трубы проведено исследование влияния степени загрязнения межреберного пространства на коэффициент теплопередачи с учетом интенсивности теплоотдачи воздуха, свойств и состава загрязнения. Установлено, что наибольшее влияние на коэффициент теплопередачи оказывает толщина слоя загрязнения у основания ребер. Это связано, прежде всего, с изменением фактического коэффициента оребрения. Показано, что теплопроводность внешнего загрязнения заметно влияет на коэффициент теплопередачи при работе теплообменника в режиме вынужденной конвекции воздуха.

**Ключевые слова:** электротепловая аналогия, теплопроводность, термическое сопротивление, коэффициент оребрения, конвективный теплообмен, число Био, функция Бесселя, безразмерная температура

**Для цитирования:** Дударев, В. В. Методика расчета и анализ коэффициента теплопередачи биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения с неравномерным внешним загрязнением / В. В. Дударев, С. О. Филатов, Т. Б. Карлович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 3. С. 237–255. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-237-255

---

### Адрес для переписки

Филатов Святослав Олегович  
Белорусский государственный  
технологический университет  
ул. Свердлова, 13а,  
220006, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 327-87-30  
filatau.sviataslau@gmail.com

### Address for correspondence

Filatau Svyatoslav O.  
Belarusian State  
Technological University  
13a Sverdlova str.,  
220006, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 327-87-30  
filatau.sviataslau@gmail.com

---

## The Method of Calculation and Analysis of Heat Transfer Coefficient of Bimetallic Finned Tubes of Air Cooling Units with Irregular External Contamination

V. V. Dudarev<sup>1)</sup>, S. O. Filatau<sup>1)</sup>, T. B. Karlovich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article focuses on a new method of calculating heat transfer coefficient of bimetallic finned tubes of air coolers taking into account external operational pollution. In contrast to well-known methods that use the assumption of a uniform distribution of operational contamination layer with a constant thickness over the entire surface of the fins in the present method being introduced it is assumed that the thickness of the pollution layer during long-term operation is changed irregularly. Under such conditions the thickness of the pollution layer at the base of the fins becomes much greater than at the rest of the finned surface. The suggested method is based on a mathematical model developed with the use of the method of electrothermal analogy, whereby the heat flow through the wall of the finned tube is considered as divided into two components, viz. through the annular layer of outside contamination adjacent to the base of the ribs, and through the remaining part of the external ribbed surface covered with a thin layer of pollution. Within the framework of the developed methodology a new method for determining the thermal resistance of the pollution layer, which is based on analytical solution of two dimensional problem of heat conduction in the annular layer has been created. With the use of this technique the influence of the degree of contamination of the intercostal space of the industrially manufactured bimetallic finned tubes on the heat transfer coefficient has been studied taking into account the intensity of heat transfer of air and the properties and composition of the pollutant for industrial manufactured bimetallic finned tubes. It is established that a layer thickness of the pollutant at the base of the ribs has the greatest influence on the heat transfer coefficient. This is due primarily to the change of actual coefficient of the fins. It is demonstrated that the heat conductivity of the external pollutant has a significant impact on the heat transfer coefficient when the heat exchanger functions in the mode of forced convection of air.

**Keywords:** electro-thermal analogy, heat conductivity, thermal resistance, finned surface factor, convective heat transfer, Biot number, Bessel function, dimensionless temperature

**For citation:** Dudarev V. V., Filatau S. O., Karlovich T. B. (2017) The Method of Calculation and Analysis of Heat Transfer Coefficient of Bimetallic Finned Tubes of Air Cooling Units with Irregular External Contamination. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 237–255. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-237-255 (in Russian)

### Введение

Широкое распространение аппаратов воздушного охлаждения (АВО) в химической, нефтегазовой, пищевой и газотранспортной отраслях промышленности обусловлено доступностью и экологической безопасностью воздуха, который в таких теплообменных аппаратах используется в качестве охлаждающей среды для снижения температуры технологических жидкостей и паров, а также для конденсации последних. Существенным преимуществом воздушного охлаждения по сравнению с широко используемым водяным охлаждением является отсутствие необходимости создания сложных систем водоподготовки и сброса в окружающую среду загрязненной охлаждающей воды.

Основные издержки при использовании АВО связаны с затратами электроэнергии на привод вентиляторов и капитальными затратами, которые напрямую зависят от площади теплообмена. Как и для любых рекуперативных теплообменных аппаратов, площадь внешней поверхности теплообмена для АВО находится в ходе конструктивного расчета по формуле

$$F = \frac{Q}{k\Delta t},$$

где  $Q$  – тепловой поток, определяемый из уравнений теплового баланса, составленных для теплообменного аппарата, Вт;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t$  – средний температурный напор, °С.

Наиболее распространенной теплообменной поверхностью АВО являются биметаллические ребристые трубы (БРТ) (рис. 1), размеры и количество которых в трубном пучке выбираются таким образом, чтобы обеспечивалась необходимая площадь поверхности теплообмена в соответствии с соотношением

$$F = \varphi_0 \pi d_0 l n_p,$$

где  $\varphi_0$  – коэффициент оребрения незагрязненной трубы;  $d_0$  – диаметр оболочки, м;  $l$  – длина одной БРТ, м;  $n_p$  – количество БРТ.

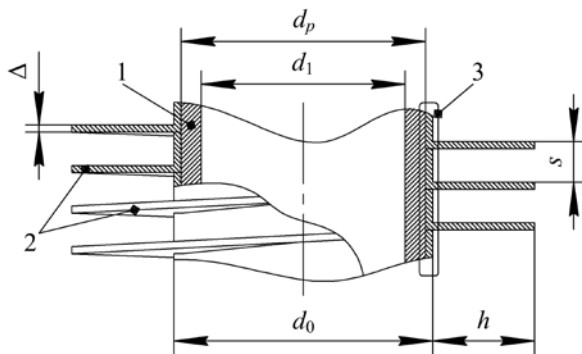


Рис. 1. Элемент незагрязненной биметаллической ребристой трубы:

1 – несущая труба; 2 – ленточное оребрение; 3 – оболочка

Fig. 1. An element of a bimetallic finned tube without contamination:

1 – carrier pipe; 2 – bend fins; 3 – shell

Коэффициент оребрения незагрязненной БРТ  $\varphi_0$  представляет собой отношение наружной площади оребрения к площади гладкой трубы с диаметром по основанию ребер  $d_0$  (диаметр оболочки) и для плоских круглых ребер приближенно рассчитывается по формуле [1]

$$\varphi_0 = 1 + \frac{2h}{d_0 s} (\Delta + d_0 + h),$$

где  $h$ ,  $s$  – высота и шаг ребра, м;  $\Delta$  – толщина ребра, м.

Геометрические характеристики промышленно изготавливаемых БРТ изменяются в следующих диапазонах:  $h = 9,5\text{--}16,0$  мм;  $s = 2,3\text{--}4,0$  мм;  $\Delta = 0,35\text{--}0,75$  мм;  $d_0 = 26\text{--}38$  мм [1]. В соответствии с широко используемыми методиками [1–4] коэффициент теплопередачи  $k$  для таких труб представляет собой обратную величину полного термического сопротивления

$$k = (R_1 + R_{f1} + R_p + R_c + R_0 + R_{f2} + R_2)^{-1}, \quad (1)$$

где  $R_1$  – сопротивление теплоотдаче со стороны охлаждаемого теплоносителя,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $R_{f1}$  – термическое сопротивление внутреннего слоя загрязнения со стороны охлаждаемого теплоносителя,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $R_p$  – то же несущей трубы,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $R_c$  – контактное термическое сопротивление между несущей трубой и оболочкой,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $R_0$  – термическое сопротивление оболочки,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $R_{f2}$  – то же внешнего эксплуатационного загрязнения,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ ;  $R_2$  – сопротивление теплоотдаче со стороны охлаждающего воздуха,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ .

Термические сопротивления, входящие в (1), отнесены к площади незагрязненной наружной поверхности БРТ и согласно [1–4] рассчитываются по формулам, приведенным ниже.

Сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности трубы имеет вид

$$R_1 = \frac{\varphi_0 d_0}{\alpha_1 (d_1 - 2\delta_1)}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи со стороны охлаждаемого теплоносителя,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $d_1$  – внутренний диаметр несущей трубы, м;  $\delta_1$  – толщина слоя внутреннего загрязнения, м.

Расчет коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  для наиболее распространенных технологических сред в виде потоков однофазной среды или конденсирующихся парожидкостных смесей ведется по методикам, изложенным в [1–6]. Термические сопротивления внутреннего слоя загрязнения  $R_{f1}$ , несущей трубы  $R_p$  и оболочки  $R_0$  рассчитываются по формулам для цилиндрической стенки:

$$R_{f1} = \frac{\varphi_0 d_0}{2\lambda_{f1}} \ln \frac{d_1}{d_1 - 2\delta_1}; \quad (3)$$

$$R_p = \frac{\varphi_0 d_0}{2\lambda_p} \ln \frac{d_p}{d_1}; \quad (4)$$

$$R_0 = \frac{\varphi_0 d_0}{2\lambda_0} \ln \frac{d_0}{d_p}, \quad (5)$$

где  $\lambda_{f1}$  – теплопроводность слоя внутреннего загрязнения, Вт/(м·К);  $\lambda_p$  – теплопроводность несущей трубы, Вт/(м·К);  $d_p$  – наружный диаметр несущей трубы, м;  $\lambda_0$  – теплопроводность оболочки, Вт/(м·К).

Наличие слоя внутреннего эксплуатационного загрязнения толщиной  $\delta_1$  приводит к уменьшению внутренней площади теплообмена БРТ с соответствующим увеличением термических сопротивлений  $R_1$  и  $R_{f1}$ . При этом толщина такого загрязнения изменяется во времени, а для прогнозирования ее увеличения в зависимости от различных факторов могут применяться математические модели различной точности, изложенные, например, в [7–9]. Контактное термическое сопротивление  $R_c$  зависит от качества механического соединения оболочки с несущей трубой и может быть рассчитано по одной из известных методик [1, 3, 10–12].

Сопротивление теплоотдаче со стороны охлаждающего воздуха рассчитывается по формуле

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2}, \quad (6)$$

где  $\alpha_2$  – средний приведенный коэффициент теплоотдачи со стороны охлаждающего воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Методики расчета коэффициентов теплоотдачи при движении воздуха в пучках ребристых труб достаточно надежны как для вынужденной [1–3, 13–16], так и для свободной конвекции [17–19] воздуха. Наличие дополнительного термического сопротивления  $R_{f2}$  обусловлено возникновением на внешней теплообменной поверхности эксплуатационного загрязнения в виде скоплений песчаной или торфяной пыли, частиц опавшей листвы, хвои, пуха и других компонентов в зависимости от местности расположения аппарата [7, 8, 20–23]. Когда внешнее загрязнение равномерно распределено по поверхности БРТ в виде тонкого слоя (пленки) с постоянной толщиной  $\delta_2$  (рис. 2), его термическое сопротивление приближенно рассчитывают по формуле для плоского слоя [24]

$$R_{f2} = \frac{\delta_2}{\lambda_{f2}}, \quad (7)$$

где  $\delta_2$  – толщина тонкого слоя внешнего загрязнения, м;  $\lambda_{f2}$  – теплопроводность внешнего загрязнения, Вт/(м·К).

Многолетний опыт проектирования АВО [1–3] подтверждает обоснованность применения формул (1)–(7) для инженерных расчетов коэффициента теплопередачи незагрязненных БРТ (рис. 1) или с равномерным

тонким слоем внешнего эксплуатационного загрязнения (рис. 2). Однако такой характер распределения загрязнения по внешней поверхности может иметь место лишь на начальном этапе работы АВО.

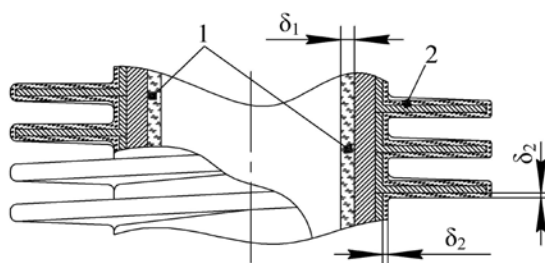


Рис. 2. Элемент ребристой трубы с равномерным тонким слоем внешнего загрязнения:  
1 – внутреннее загрязнение; 2 – равномерный тонкий слой внешнего загрязнения

Fig. 2. An element of a finned tube with a regular layer of external contamination:  
1 – internal contamination; 2 – regular layer of external contamination

С течением времени заполнение межреберного пространства загрязнением происходит неравномерно. В первую очередь заполняется пространство у основания ребер, как это показано на рис. 3, что фактически уменьшает высоту ребер  $h_f$  на величину толщины такого загрязнения  $\delta$ , т. е.  $h_f = h - \delta$ .

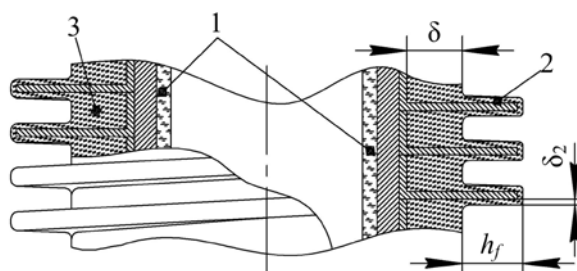


Рис. 3. Элемент ребристой трубы с неравномерным слоем внешнего загрязнения:  
1 – внутреннее загрязнение; 2 – тонкий слой равномерного загрязнения;  
3 – кольцевой слой загрязнения у основания ребер

Fig. 3. An element of a finned tube with irregular layer of external contamination:  
1 – internal contamination; 2 – thin regular layer of contamination;  
3 – ring layer of contamination at a base of fins

При этом происходит соответствующее изменение коэффициента оребрения, а термическое сопротивление кольцевого слоя загрязнения толщиной  $\delta$ , примыкающего к основанию ребер, становится больше, чем тонкого (пленочного) слоя загрязнения толщиной  $\delta_2$ , покрывающего остальную верхнюю часть поверхности ребер. Далее по тексту для обозначения указанных слоев используются понятия «кольцевой слой» и «тонкий слой». Данная особенность не учитывается при расчетах по известным методикам [1–4], поэтому определение термического сопротивления такого неравномерного экс-

платационного загрязнения по формуле (7) может дать существенное расхождение с реальной величиной. Следовательно, актуальной является задача развития методики расчета коэффициента теплопередачи БРТ с учетом неравномерного характера внешнего эксплуатационного загрязнения.

### Методика расчета коэффициента теплопередачи биметаллической ребристой трубы с неравномерным загрязнением

В настоящей статье представлена методика расчета коэффициента теплопередачи БРТ с неравномерным внешним загрязнением, основанная на применении метода электротепловой аналогии. Используемое допущение: спиральные ребра рассматриваются как кольцевые диски постоянной толщины и считаются термически тонкими телами. Такое допущение применяется и в известных методиках [8, 10–12]. Также в соответствии с принципом электротепловой аналогии принимается, что процесс переноса теплоты от внутреннего теплоносителя через загрязненную БРТ к охлаждающему наружному воздуху можно представить в виде схемы (рис. 4), которая эквивалентна схеме электрической цепи постоянного тока. Здесь аналогами являются: электрических сопротивлений – соответствующие термические сопротивления; электрического тока – тепловые потоки; перепадов напряжения – разности температур. При этом условно выделяются два тепловых потока  $Q'$  и  $Q''$ . Тепловой поток  $Q'$  проходит через кольцевой слой загрязнения в виде полого цилиндра, причем теплота поступает от его внутренней поверхности и торцов к наружной поверхности, омываемой охлаждающим воздухом. Тепловой поток  $Q''$  проходит через тонкий слой загрязнения в перпендикулярном направлении к его поверхности, как при переносе теплоты через плоскую стенку. Принимается, что теплового взаимодействия между кольцевым и тонким слоями не происходит из-за малой площади контакта между ними по сравнению с их размерами. В результате общий тепловой поток представляет собой сумму:  $Q = Q' + Q''$ .

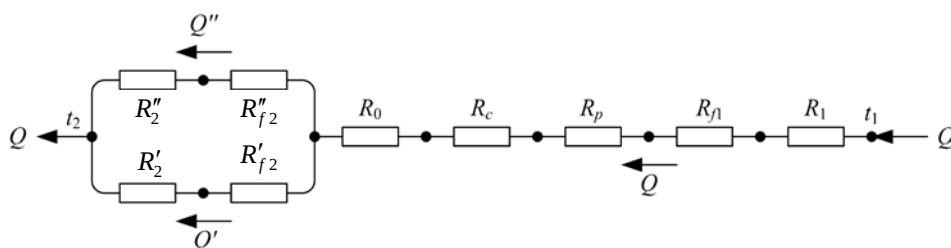


Рис. 4. Схема для расчета коэффициента теплопередачи

Fig. 4. The scheme for calculation of overall heat transfer coefficient

Кроме рассмотренных в (1)–(7) термических сопротивлений в эквивалентной схеме дополнительно вводятся:  $R'_{f2}$  – термическое сопротивление кольцевого слоя загрязнения,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;  $R''_{f2}$  – то же тонкого слоя загрязне-

ния,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;  $R'_2$  – сопротивление теплоотдаче на свободной поверхности кольцевого слоя загрязнения,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;  $R''_2$  – то же на поверхности тонкого слоя загрязнения,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Используя формулы, аналогичные уравнениям для электрических цепей, определяли общее сопротивление цепи, приведенной на рис. 4, обратная величина которого представляет собой коэффициент теплопередачи БРТ с неравномерным характером внешнего загрязнения

$$k = \left[ R_1 + R_{f1} + R_p + R_c + R_0 + \frac{(R'_2 + R'_{f2})(R''_2 + R''_{f2})}{R'_2 + R'_{f2} + R''_2 + R''_{f2}} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Дополнительно введенные термические сопротивления определяли следующим образом:

$$R'_{f2} = \frac{\Phi_0}{\Phi_2 + \Phi_3} R_{f2}; \quad (9)$$

$$R'_2 = \frac{\Phi_0}{\Phi_1} R_2; \quad (10)$$

$$R''_2 = \frac{\Phi_0}{\Phi_2 + \Phi_3} R_2, \quad (11)$$

где  $\Phi_1$  – составляющая коэффициента оребрения, которая характеризует увеличение площади поверхности теплообмена при росте диаметра трубы за счет дополнительного кольцевого слоя загрязнения толщиной  $\delta$ ;  $\Phi_2$  – то же, характеризующая увеличение площади теплообменной поверхности за счет боковой поверхности ребер с учетом тонкого равномерного слоя загрязнения толщиной  $\delta_2$ ;  $\Phi_3$  – то же, которая характеризует увеличение площади поверхности теплообмена за счет торцевой поверхности ребер с учетом тонкого слоя загрязнителя толщиной  $\delta_2$ .

Составляющие  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  находятся по соотношениям:

$$\Phi_1 = \frac{(d_0 + 2\delta)(s - \Delta - 2\delta_2)}{d_0 s};$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{2} \frac{(d_0 + 2h + 2\delta_2)^2 - (d_0 + 2\delta)^2}{d_0 s};$$

$$\Phi_3 = \frac{(d_0 + 2h + 2\delta_2)(\Delta + 2\delta_2)}{d_0 s},$$

а их сумма представляет собой фактический коэффициент оребрения загрязненной БРТ

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3,$$

который является отношением площади наружной поверхности БРТ с внешним загрязнением к площади гладкой трубы с диаметром по основанию ребер  $d_0$ .

Термическое сопротивление  $R'_{f2}$ , отнесенное к площади наружной поверхности незагрязненной БРТ, определяли из условия равенства значений теплового потока, проходящего через кольцевой слой внешнего загрязнения и рассеиваемого затем за счет теплоотдачи с его свободной поверхности к охлаждающему воздуху:

$$Q' = \frac{F}{R'_{f2}}(t_{f1} - t_{f2}) = \alpha_2 F \frac{\Phi_1}{\Phi_0}(t_{f2} - t_2), \quad (12)$$

где  $Q'$  – тепловой поток, проходящий через кольцевой слой загрязнения и его свободную поверхность, Вт;  $F$ ,  $F \frac{\Phi_1}{\Phi_0}$  – площадь наружной поверхности незагрязненной БРТ и свободной поверхности кольцевого слоя,  $\text{м}^2$ ;  $t_{f1}$  – средняя температура поверхности контакта ребер и оболочки с кольцевым слоем загрязнения,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{f2}$  – средняя температура свободной наружной поверхности кольцевого слоя загрязнения,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2$  – температура охлаждающего воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

С учетом того, что  $R_2 = 1/\alpha_2$ , после приведения средней температуры свободной наружной поверхности кольцевого слоя загрязнения к безразмерной форме

$$\theta_{f2} = \frac{t_{f2} - t_2}{t_{f1} - t_2}$$

соотношение для расчета термического сопротивления кольцевого слоя загрязнения принимает вид

$$R'_{f2} = R_2 \frac{\Phi_0}{\Phi_1} \frac{1 - \theta_{f2}}{\theta_{f2}}. \quad (13)$$

При подстановке (9)–(11) и (13) в (8) получается более удобное для использования соотношение

$$k = \left[ R_1 + R_{f1} + R_p + R_c + R_0 + \frac{\Phi_0 R_2 (R_2 + R_{f2})}{R_2 (\Phi_2 + \Phi_3) + \theta_{f2} \Phi_1 (R_2 + R_{f2})} \right]^{-1}. \quad (14)$$

Расчет средней безразмерной температуры свободной поверхности кольцевого слоя загрязнения, входящей в (13), является самостоятельной задачей; ее решение рассматривается в следующем разделе статьи.

### Определение средней безразмерной температуры поверхности кольцевого слоя загрязнения

В настоящем исследовании определение средней безразмерной температуры поверхности кольцевого слоя загрязнения основано на решении двумерной стационарной задачи теплопроводности в кольцевом слое загрязнения толщиной  $\delta$ . Загрязнение образует короткий полый цилиндр, внутренняя поверхность и торцы которого контактируют с оболочкой и ребрами, а наружная поверхность обтекается потоком охлаждающего воздуха (рис. 3, 5). Размеры полого цилиндра: высота  $z_{\max} = s - \Delta$  (расстояние между загрязненными боковыми поверхностями соседних ребер); внутренний радиус  $r_{\min} = 0,5d_0$  (расстояние от оси трубы до наружной поверхности оболочки); наружный радиус  $r_{\max} = 0,5d_0 + \delta$  (расстояние от оси трубы до наружной поверхности кольцевого слоя загрязнения).

Ребра рассматриваемых труб изготавливаются из высокотеплопроводных материалов: меди ( $\lambda_0 = 398$  Вт/(м·К)), алюминия ( $\lambda_0 = 210$  Вт/(м·К)) и его сплавов, например дюралюминия ( $\lambda_0 = 169$  Вт/(м·К)) и латуни ( $\lambda_0 = 109$  Вт/(м·К)). Высокая теплопроводность ребер в сочетании с их геометрическими характеристиками ( $h = 9,5\text{--}16,0$  мм;  $\Delta = 0,35\text{--}0,75$  мм [1, 13]) позволяют считать ребра термически тонкими телами с одинаковой температурой по всему объему.

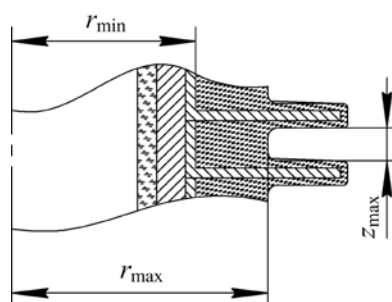


Рис. 5. Фрагмент загрязненной поверхности трубы

Fig. 5. An element of the contaminated surface of a pipe

В свою очередь, при сопоставимости размера кольцевого слоя и ребер теплопроводность первого, согласно экспериментальным исследованиям [25, 26], в зависимости от состава загрязнения изменяется в диапазоне  $\lambda_{p2} = 0,05\text{--}0,35$  Вт/(м·К). Из-за значительно меньшей теплопроводности загрязнения по сравнению с теплопроводностью материала ребер термическое сопротивление кольцевого слоя будет на два-три порядка больше, чем у ребер. Следовательно, кольцевой слой загрязнения является термически массивным телом с неоднородным температурным полем. Исходя из этого, принимается допущение об изотермичности поверхностей контакта кольцевого слоя загрязнения (полого цилиндра) с ребрами и обо-

лочкой, что соответствует граничному условию 1-го рода. На наружной поверхности кольцевого слоя загрязнения, который контактирует с охлаждающим воздухом, задается граничное условие 3-го рода. С учетом вышеперечисленных допущений задача о распределении температуры в кольцевом слое загрязнения сводится к решению стационарного уравнения теплопроводности с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad \text{при } 0 \leq z \leq z_{\max}, \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; \quad (15)$$

$$t = t_{f1} \quad \text{при } 0 \leq z \leq z_{\max}, \quad r = r_{\min}; \quad (16)$$

$$t = t_{f1} \quad \text{при } z = 0, \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; \quad (17)$$

$$t = t_{f1} \quad \text{при } z = z_{\max}, \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; \quad (18)$$

$$-\lambda_{f2} \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha_2 (t - t_2) \quad \text{при } 0 \leq z \leq z_{\max}, \quad r = r_{\max}, \quad (19)$$

где  $t$  – температура, °C;  $r, z$  – радиальная и осевая координаты, м;  $z_{\max}$  – максимальное значение осевой координаты, м;  $r_{\min}, r_{\max}$  – минимальное и максимальное значения радиальной координаты, м.

Путем замены переменных:

$$\bar{z} = \frac{z}{z_{\max}}; \quad \bar{r} = \frac{r}{r_{\max}}; \quad \theta = \frac{t - t_2}{t_{f1} - t_2}$$

система уравнений (15)–(19) приводится к безразмерному виду:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{r}} + u_1^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{z}^2} = 0 \quad \text{при } 0 \leq \bar{z} \leq 1, \quad \frac{u_0}{u_1} \leq \bar{r} \leq 1; \quad (20)$$

$$\theta = 1 \quad \text{при } 0 \leq \bar{z} \leq 1, \quad \bar{r} = \frac{u_0}{u_1}; \quad (21)$$

$$\theta = 1 \quad \text{при } \bar{z} = 0, \quad \frac{u_0}{u_1} \leq \bar{r} \leq 1; \quad (22)$$

$$\theta = 1 \quad \text{при } \bar{z} = 1, \quad \frac{u_0}{u_1} \leq \bar{r} \leq 1; \quad (23)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \bar{r}} = \theta \cdot \text{Bi} \cdot \frac{u_1}{u_1 - u_0} \quad \text{при } 0 \leq \bar{z} \leq 1, \quad \bar{r} = 1; \quad (24)$$

$$u_0 = \frac{r_{\min}}{z_{\max}}; \quad u_1 = \frac{r_{\max}}{z_{\max}}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda_{f2}},$$

где  $\bar{z}$ ,  $\bar{r}$  – безразмерные осевая и радиальная координаты;  $\theta$  – безразмерная температура;  $u_0, u_1$  – геометрические симплексы;  $\text{Bi}$  – число Био.

Решение уравнения (20) может быть представлено в виде периодического ряда по переменной  $\bar{z}$

$$\theta(\bar{r}, \bar{z}) = 1 - \sum_{k=0}^{\infty} \sin(\pi n \bar{z}) \Phi_n(\bar{r}), \quad (25)$$

где  $n = 2k + 1; k = 0, 1, 2, \dots, \infty$ .

В этом случае автоматически выполняются граничные условия (22) и (23), а функция  $\Phi_n(\bar{r})$ , описывающая радиальную зависимость температуры, удовлетворяет уравнению Бесселя нулевого порядка

$$\frac{\partial^2 \Phi_n(\bar{r})}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \Phi_n(\bar{r})}{\partial \bar{r}} - (\pi n u_1)^2 \Phi_n(\bar{r}) = 0. \quad (26)$$

С использованием граничных условий (21), (24) и общего решения уравнения (26) в виде линейной комбинации модифицированных функций Бесселя  $I_0(\pi n u_1 \bar{r})$  и  $K_0(\pi n u_1 \bar{r})$  искомая функция  $\Phi_n(\bar{r})$  определяется выражением

$$\Phi_n(\bar{r}) = \frac{4 \text{Bi} f_0}{\pi n [F_1(U_1 - U_0) + \text{Bi} F_0]},$$

где

$$f_0 = I_0(U_1 \bar{r}) K_0(U_0) - K_0(U_1 \bar{r}) I_0(U_0);$$

$$F_1 = I_1(U_1) K_0(U_0) + K_1(U_1) I_0(U_0);$$

$$F_0 = I_0(U_1) K_0(U_0) - K_0(U_1) I_0(U_0);$$

$$U_0 = \pi n u_0;$$

$$U_1 = \pi n u_1.$$

Для расчета термического сопротивления кольцевого слоя загрязнения по формуле (13) требуется средняя безразмерная температура его наружной поверхности, которая находится интегрированием температуры  $\theta(\bar{z}, \bar{r})$  по осевой координате  $\bar{z}$

$$\theta_{f2} = \int_0^1 \theta(\bar{z}, \bar{r} = 1) d\bar{z} = 1 - \frac{8 \text{Bi}}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ n^2 \left[ \frac{F_1}{F_0} (U_1 - U_0) + \text{Bi} \right] \right\}^{-1}. \quad (27)$$

Соотношение (27) для расчета средней безразмерной температуры свободной поверхности кольцевого слоя загрязнения замыкает систему уравнений (2)–(7), (9)–(11), (13), (14), которая представляет собой основу методики расчета и анализа коэффициента теплопередачи БРТ с неравномерным внешним загрязнением.

### Анализ влияния параметров загрязнения на теплопередачу

Данный анализ выполняли по результатам расчетного эксперимента, проведенного с использованием представленной выше методики. В качестве объекта исследования была выбрана БРТ, изготавливаемая в промышленных объемах, со стальной несущей трубой и алюминиевыми ребрами с коэффициентом оребрения  $\phi_0 = 16,8$  и размерами  $d_0 \times d_1 \times d_p \times \Delta \times s \times h = 26,5 \times 21 \times 25 \times 0,75 \times 2,91 \times 14,55$  мм.

Серию экспериментов проводили при следующих условиях: толщину тонкого слоя внешнего загрязнения принимали  $\delta_2 = 0,1$  мм; теплопроводность материала внешнего эксплуатационного загрязнения  $\lambda_{p2}$  в зависимости от состава изменялась в диапазонах  $0,05$ – $0,35$  Вт/(м·К), который экспериментально определен в [25, 26] для основных типов загрязнений АВО; коэффициент теплоотдачи внутри труб принимали  $\alpha_1 = 1500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (возможное значение для теплоотдачи компримируемого природного газа или конденсации паров углеводородов [5]); коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха  $\alpha_2$  варьировался в диапазонах  $0,3$ – $60$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и охватывал область вынужденной [1] и свободной [17–19] конвекций воздуха в АВО.

На первом этапе анализа проведено исследование влияния толщины кольцевого слоя загрязнения на изменение фактического коэффициента оребрения  $\phi$  и его составляющих  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$ . Обобщенные результаты в виде зависимостей  $\phi/\phi_0$ ,  $\phi_1/\phi$ ,  $\phi_2/\phi$  и  $\phi_3/\phi$  от относительной толщины кольцевого слоя загрязнения  $\delta/h$ , которую можно рассматривать как степень загрязнения межреберного пространства, представлены на рис. 6. Кривая 1 демонстрирует постепенное уменьшение коэффициента оребрения при увеличении степени загрязнения  $\delta/h$ , причем после  $\delta/h \approx 0,75$  это падение усиливается. Характер кривых 2–4 показывает, что с увеличением толщины кольцевого слоя составляющие коэффициента оребрения  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  и  $\phi_3$  изменяются по-разному. Так, на ранней стадии эксплуатации АВО, когда поверхность ребер не загрязнена ( $\delta/h = 0$ ), основной теплообменной поверхностью является боковая поверхность ребер, на которую приходится около 92 % площади внешней поверхности ( $\phi_2/\phi \approx 0,92$ ). Оставшаяся площадь приходится на поверхность трубы у основания ( $\phi_1/\phi \approx 0,045$ ) и торцы ребер ( $\phi_3/\phi \approx 0,035$ ). С увеличением степени загрязнения  $\delta/h$  площадь плоской боковой поверхности ребер постепенно уменьшается (уменьшение  $\phi_2/\phi$ ), а площадь поверхности между ребрами у их основания и торцов

ребер увеличивается (увеличение  $\varphi_1/\varphi$  и  $\varphi_3/\varphi$ ). При  $\delta/h > 0,65$  происходит резкое снижение  $\varphi_2/\varphi$  и увеличение  $\varphi_1/\varphi$  и  $\varphi_3/\varphi$ , вплоть до их выравнивания ( $\varphi_2/\varphi = \varphi_1/\varphi$  при  $\delta/h \approx 0,92$  и  $\varphi_2/\varphi = \varphi_3/\varphi$  при  $\delta/h \approx 0,96$ ). При полном загрязнении ( $\delta/h = 1$ ) плоская поверхность ребер полностью закрывается кольцевым слоем ( $\varphi_2/\varphi = 0$ ), а теплообмен происходит на поверхности цилиндрического слоя загрязнения и торцов ребер ( $\varphi_1/\varphi = 0,66$  и  $\varphi_3/\varphi = 0,34$ ).

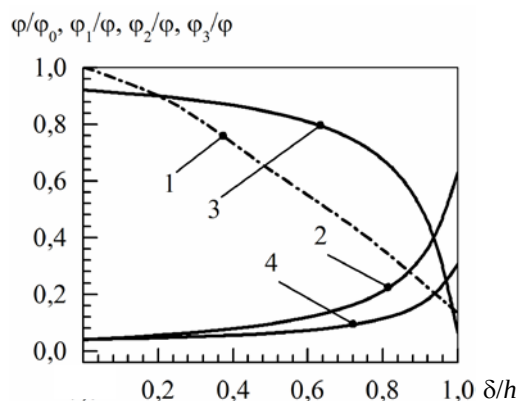


Рис. 6. Влияние степени загрязнения на коэффициент оребрения и его составляющие:

1 —  $\varphi/\varphi_0$ ; 2 —  $\varphi_1/\varphi$ ; 3 —  $\varphi_2/\varphi$ ; 4 —  $\varphi_3/\varphi$

Fig. 6. Influence of contamination rate on a finned surface factor and on its parts:

1 —  $\varphi/\varphi_0$ ; 2 —  $\varphi_1/\varphi$ ; 3 —  $\varphi_2/\varphi$ ; 4 —  $\varphi_3/\varphi$

Далее выполняли анализ влияния коэффициента теплоотдачи воздуха  $\alpha_2$ , толщины  $\delta$  и теплопроводности  $\lambda_{p2}$  кольцевого слоя загрязнения на коэффициент теплопередачи  $k$ . Результаты данного исследования обобщены и представлены на рис. 7 в виде зависимости отношения коэффициентов теплопередачи незагрязненной и загрязненной труб  $k_0/k$  от числа  $Bi$ , которое можно интерпретировать как соотношение между интенсивностью теплоотдачи со стороны воздуха и интенсивностью переноса теплоты теплопроводностью в кольцевом слое загрязнения. На рис. 7 показаны кривые  $k_0/k = f(Bi)$  при минимальной ( $\lambda_{p2} = 0,05$  Вт/(м·К)) и максимальной ( $\lambda_{p2} = 0,35$  Вт/(м·К)) теплопроводностях загрязнения, а заштрихованная область между кривыми соответствует возможным значениям  $k_0/k$  при различных  $\lambda_{p2} = 0,05\text{--}0,35$  Вт/(м·К) и заданной степени загрязнения  $\delta/h$ .

Как видно из рис. 7, наибольшее влияние на коэффициент теплопередачи  $k$  оказывает степень загрязнения  $\delta/h$ , с увеличением которой  $k$  снижается в разы. При 10%-м загрязнении ( $\delta/h = 0,1$ ) коэффициент теплопередачи уменьшается в 1,02–1,05 раза. В то же время при полном загрязнении межреберного пространства ( $\delta/h = 1$ )  $k$  принимает минимальные значения, которые в 4,0–7,5 раза меньше коэффициента теплопередачи незагрязненной БРТ  $k_0$  во всем диапазоне числа Био. Сопоставляя данный результат

с рис. 6, можно отметить, что снижение коэффициента теплопередачи в первую очередь связано с уменьшением коэффициента оребрения.

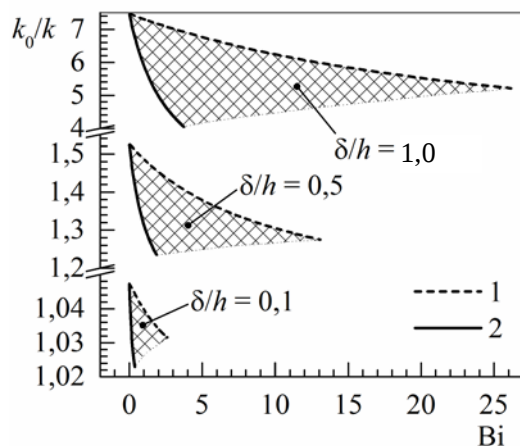


Рис. 7. Влияние числа Био на коэффициент теплопередачи  $\lambda_{f2}$ , Вт/(м·К), равный:  
1 – 0,05; 2 – 0,35

Fig. 7. Influence of Biot number on overall heat transfer coefficient  $\lambda_{f2}$ , W/(m·K), that is equal to:  
1 – 0,05; 2 – 0,35

На рис. 7 также продемонстрировано, что при заданном диапазоне  $\lambda_{f2}$  с уменьшением числа Био и степени загрязнения  $\delta/h$  сужается область возможных значений  $k_0/k$ , что объясняется несколькими причинами. Во-первых, при малых числах Био ( $\alpha_2 < \lambda_{f2}/\delta$ ) теплопередача лимитируется интенсивностью теплоотдачи со стороны воздуха, которая в этом случае меньше, чем интенсивность переноса теплоты за счет теплопроводности в слое загрязнения. Это может иметь место при естественной конвекции воздуха. При больших числах Био ( $\alpha_2 > \lambda_{f2}/\delta$ ), соответствующих вынужденной конвекции воздуха с интенсивной теплоотдачей, теплопередача в большей степени начинает зависеть от теплопроводности слоя загрязнения  $\lambda_{f2}$ . Во-вторых, увеличение влияния  $\lambda_{f2}$  при росте  $\delta/h$  связано с уменьшением составляющей коэффициента оребрения  $\varphi_2$ , что ведет к пропорциональному уменьшению доли теплового потока через боковую поверхность ребер, не закрытую кольцевым слоем загрязнения (рис. 6, кривая 3). При этом увеличивается вторая составляющая теплового потока, которая зависит от величины термического сопротивления кольцевого слоя загрязнения, а следовательно, и от его теплопроводности.

### ВЫВОДЫ

1. Разработана новая методика расчета коэффициента теплопередачи биметаллических ребристых труб на основе электротепловой аналогии и аналитического решения уравнения теплопроводности, позволяющая учесть размеры и теплопроводность внешнего загрязнения с неравномер-

ным характером его распределения в межреберном пространстве. Наибольшее влияние на коэффициент теплопередачи оказывает степень загрязнения, увеличение которой до максимальных значений, соответствующих полному заполнению межреберного пространства, ведет к снижению коэффициента теплопередачи в 4,0–7,5 раза относительно незагрязненной биметаллической ребристой трубы, что обусловлено в первую очередь уменьшением коэффициента оребрения.

2. Влияние теплопроводности загрязнения на коэффициент теплопередачи увеличивается с ростом интенсивности теплоотдачи со стороны охлаждающего воздуха и становится особенно заметным при работе аппаратов воздушного охлаждения в режиме вынужденной конвекции. В этом случае для получения достоверных значений коэффициента теплопередачи необходимы точные значения теплопроводности загрязнения. При проектировании аппаратов, работающих в режиме естественной конвекции воздуха с малой интенсивностью теплоотдачи, теплопроводность загрязнения может быть выбрана ориентировочно, так как точность ее значения не окажет существенного влияния на достоверность расчета коэффициента теплопередачи.

3. Представленная методика расчета и результаты анализа могут быть использованы предприятиями, занимающимися производством и эксплуатацией аппаратов воздушного охлаждения, для анализа и прогнозирования их теплотехнических характеристик с учетом различной степени загрязнения ребристых труб. При известном временном изменении степени загрязнения теплообменной поверхности на основе представленной методики может определяться непрерывный срок службы аппаратов воздушного охлаждения, в течение которого они будут работать в расчетном режиме с допустимыми значениями коэффициента теплопередачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кунтыш, В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
2. Методика теплового и аэродинамического расчета аппаратов воздушного охлаждения. М.: ВНИИнефтемаш, 1971. 102 с.
3. Керн, Д. Развитие поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус. М.: Энергия, 1977. 461 с.
4. Машины и аппараты химических производств: примеры и задачи / И. В. Доманский [и др.]. Л.: Машиностроение, 1982. 384 с.
5. Примеры расчетов нестандартизованных эффективных теплообменников / В. Б. Кунтыш [и др.]. СПб.: Недра, 2000. 300 с.
6. Кунтыш, В. Б. Кожухотрубные теплообменные аппараты: расчет и конструирование / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. Ш. Миннигалиев. СПб.: Недра, 2014. 264 с.
7. Bott, T. R. Fouling of Heat Exchangers / T. R. Bott. Amsterdam: Elsevier, 1995. 546 p.
8. Müller-Steinhagen, H. Heat Exchanger Fouling. Mitigation and Cleaning Technologies / H. Müller-Steinhagen. Essen: PUBLICO Publications, 2000. 382 p.

9. Анализ методик расчета теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическая техника. 2015. № 4. С. 14–17.
10. Kuntysch, V. B. Thermal Contact Resistance of a Bimetallic Finned Pipe and a Method of Calculating Interference Between Contacting Surfaces / V. B. Kuntysch, N. N. Stenin // Chemical and Petroleum Engineering. 1997. Vol. 33, Iss. 6. P. 665–671.
11. Андрижневский, А. А. Тестирование биметаллических ребристых труб по величине термического сопротивления механического контакта несущей трубы и оребренной оболочки / А. А. Андрижневский, В. В. Дударев, А. Б. Сухоцкий // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. 2013. № 3. С. 166–169.
12. Effect of Maximum Temperature and Heating-Cooling Repeated Cycles on Thermal Contact Resistance of a Composite Tube / I. Carvajal-Mariscal [et al.] // Applied Mechanics and Materials. 2009. Vol. 15. P. 41–46.
13. Тепловые и аэродинамические характеристики пучков из биметаллических ребристых труб завода «Октябрьскиммаш» / А. Э. Пиир [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. Т. 42, № 5–6. С. 235–240.
14. Письменный, Е. Н. Универсальная зависимость для расчета конвективного теплообмена поперечно-обтекаемых пучков гладких труб / Е. Н. Письменный // Теплоэнергетика. 2010. Т. 57, № 3. С. 34–41.
15. Pismennyi, E. N. An Asymptotic Approach to Generalizing the Experimental Data on Convective Heat Transfer of Tube Bundles in Crossflow / E. N. Pismennyi // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54, Iss. 19–20. P. 4235–4246.
16. Результаты исследования тепловых характеристик пучка воздухоподогревателя из биметаллических ребристых труб / В. Б. Кунтыш [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 1. С. 48–56.
17. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками / А. В. Самородов. Архангельск, 1999. 172 с.
18. Kuntysch, V. B. Experimental Investigation of Free-Convection Heat Exchange Between Multiple-Row Staggered Banks of Tubes with Spiral Fins / V. B. Kuntysch, A. V. Samorodov, A. N. Bessonnyi // Chemical and Petroleum Engineering. 2008. Vol. 44, Iss. 3. P. 113–120.
19. Кунтыш, В. Б. Теплоотдача естественной конвекцией одиночного ряда вертикальных оребренных труб калориферов лесосушильных камер / В. Б. Кунтыш, А. В. Позднякова, В. И. Мелехов // Лесной журнал. Изв. высш. учеб. заведений. 2002. № 2. С. 116–121.
20. Беркутов, Р. А. Оценка загрязнений аппаратов воздушного охлаждения методом корреляционно-регрессивного анализа / Р. А. Беркутов // Нефть и газ. Изв. вузов. 2010. № 1. С. 123–127.
21. Bell, I. H. Air-Side Particulate Fouling of Microchannel Heat Exchangers: Experimental Comparison of Air-Side Pressure Drop and Heat Transfer with Plate-Fin Heat Exchanger / I. H. Bell, E. A. Groll // Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31, Iss. 5. P. 742–749.
22. Effects of Biofouling on Air-Side Heat Transfer and Pressure Drop for Finned Tube Heat Exchangers / H. Pua [et al.] // International Journal of Refrigeration. 2009. Vol. 32, Iss. 5. P. 1032–1040.
23. An Experimental Study of the Air-Side Particulate Fouling in Fin-and-Tube Heat Exchangers of Air Conditioners / Young-Chull Ahn [et al.] // Korean Journal of Chemical Engineering. 2003. Vol. 20, Iss. 5. P. 873–877.
24. Дифференцированный учет термического сопротивления внешнего загрязнителя оребрения труб шахматных пучков в тепловом расчете воздухоохлаждаемых теплообменников / А. Б. Сухоцкий [и др.] // XV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ., Минск, 23–26 мая 2016 г. Минск: ИТМО имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Т. 3. С. 424–426.
25. Исследование теплопроводности внешних загрязнителей теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическая техника. 2013. № 11. С. 35–38.

26. Влияние внешних загрязнителей на интенсивность теплопередачи воздушных теплообменников компрессорных станций магистральных газопроводов / В. Б. Кунтыш [и др.] // XV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ., Минск, 23–26 мая 2016 г. Минск: ИТМО имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Т. 3. С. 162–163.

Поступила 21.12.2016 Подписана в печать 22.02.2017 Опубликовано онлайн 30.05.2017

#### REFERENCES

1. Kuntyshev V. B., Kuznetsov N. M. (1992) *Thermal and Aerodynamic Calculations of Finned Air Cooling Heat Exchangers*. St.-Petersburg, Energoatomizdat Publ. 280 (in Russian).
2. *Method of Thermal and Aerodynamic Calculation of Air Coolers* (1971). Moscow, VNIIneftemash. 102 (in Russian).
3. Kern D., Kraus A. (1977) *The Developed Surface of Heat Exchange*. Moscow, Energiya Publ. 461 (in Russian).
4. Domanskii I. V., Isakov V. P., Ostrovskii G. M., Sokolov V. N. (1982) *Machines and Apparatuses of Chemical Productions. Cases and Problems*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 384 (in Russian).
5. Kuntyshev V. B., Bessonnyi A. N., Dreitser G. A., Egorov I. F. (2000) *Specimens of Calculations of Non-Standardized Efficient Heat Exchangers*. St.-Petersburg, Nedra Publ. 300 (in Russian).
6. Kuntyshev V. B., Sukhotskii A. B., Minnigaleev A. Sh. (2014) *Shell and Tube Heat Exchangers (Calculation and Design)*. St.-Petersburg, Nedra Publ. 264 (in Russian).
7. Bott T. R. (1995) *Fouling of Heat Exchangers*. Amsterdam, Elsevier. 546.
8. Müller-Steinhagen H. (2000) *Heat Exchanger Fouling. Mitigation and Cleaning Technologies*. Essen, PUBLICO Publications. 382.
9. Kuntyshev V. B., Sukhotskii A. B., Zhdanovich A. Yu., Piir A. E. (2015) Analysis of Methods of Calculation of Heat Transfer of Air Coolers. *Khimicheskaya Tekhnika* [Chemical Engineering], (4), 14–17 (in Russian).
10. Kuntyshev V. B., Stenin N. N. (1997) Thermal Contact Resistance of a Bimetallic Finned Pipe and a Method of Calculating Interference Between Contacting Surfaces. *Chemical and Petroleum Engineering*, 33 (6), 665–671. DOI: 10.1007/BF02430300.
11. Andrizhievskii A. A., Dudarev V. V., Sukhotskii A. B. (2013) Testing of Bimetallic Finned Tubes According to the Magnitude of the Thermal Resistance of the Mechanical Contact of the Carrier Pipe and the Finned Shell. *Trudy BGTU. Khimiya i Tekhnologiya Neorganicheskikh Veshchestv* [Proceedings of BGTU. Chemistry and Technology of Inorganic Substances], (3), 166–169 (in Russian).
12. Carvajal-Mariscal I., Sánchez-Silva F., Polupan G., Basualdo-Rojo J.A. (2009) Effect of Maximum Temperature and Heating-Cooling Repeated Cycles on Thermal Contact Resistance of a Composite Tube. *Applied Mechanics and Materials*, 15, 41–46. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.15.41.
13. Piir A. É., Roshchin S. P., Kuntyshev V. B., Bessonnyi A. N., Minnigaleyev A. Sh., Mulin V. P. (2006) Thermal and Aerodynamic Characteristics of Banks of Bimetallic Finned Tubes Manufactured by the Oktyabrskkhimmash Plant. *Chemical and Petroleum Engineering*, 42 (5–6), 235–240. DOI:10.1007/s10556-006-0085-2.
14. Pismenniy E. N. (2010) A Universal Relation for Calculating Convective Heat Transfer in Transversely Streamlined Bundles of Smooth Tubes. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 57 (3), 219–226. DOI:10.1134/s0040601510030055.
15. Pismenniy E. N. (2011) An Asymptotic Approach to Generalizing the Experimental Data on Convective Heat Transfer of Tube Bundles in Crossflow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (19–20), 4235–4246. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.05.021.
16. Kuntyshev V. B., Dudarev V. V., Sukhotsky A. B., Volodin V. I. (2014) Results of Investigations on Thermal Characteristics of Air Heater Bundle Made of Bimetallic Finned Tubes. *Energeti-*

- ka. *Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 48–56 (in Russian).
17. Samorodov A. V. (1999) *Improving the Methods of Thermal Calculation and Design of Air Coolers with Staggered Finned Bundles*. Arkhangelsk. 172 (in Russian).
  18. Kuntyshev V. B., Samorodov A. V., Bessonnyi A. N. (2008) Experimental Investigation of Free-Convection Heat Exchange Between Multiple-Row Staggered Banks of Tubes with Spiral Fins. *Chemical and Petroleum Engineering*, 44 (3), 113–120. DOI: 10.1007/s10556-008-9021-y.
  19. Kuntyshev V. B., Pozdnyakova A. V., Melekhov V. I. (2002) Heat Transfer by Natural Convection Single Series of Vertical Finned Tubes of Heaters of Wood Drying Chambers. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Lesnoi Zhurnal* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal], (2), 116–121 (in Russian).
  20. Berkutov R. A. (2010) Evaluation of the Contamination of Air Coolers Method of Correlation and Regression Analysis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Neft' i Gaz* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Oil and Gas], (1), 123–127 (in Russian).
  21. Bell I. H., Groll E. A. (2011) Air-Side Particulate Fouling of Microchannel Heat Exchangers: Experimental Comparison of Air-Side Pressure Drop and Heat Transfer with Plate-Fin Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 31 (5), 742–749. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.10.019.
  22. Pu H., Ding G., Ma X., Hu H., Gao Y. (2009) Effects of Biofouling on Air-Side Heat Transfer and Pressure Drop for Finned Tube Heat Exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 32 (5), 1032–1040. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2008.10.007.
  23. Young-Chull Ahn, Jae-Min Cho, Hee-Soo Shin, Yu-Jin Hwang, Chang-Gun Lee, Jae-Keun Lee, Hyun-Uk Lee, Tae-Wook Kang (2003) An Experimental Study of the Air-Side Particulate Fouling in Fin-and-Tube Heat Exchangers of Air Conditioners. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 20 (5), 873–877. DOI: 10.1007/BF02697291.
  24. Sukhotskii A. B. [et al.] (2016) Differentiated Account of Thermal Resistance of an External Contaminant of Tube Fins of Staggered Bundles in the Thermal Calculation of Air-Cooled Heat Exchangers. *XV Minskii Mezhdunar. Forum po Teplo- i Massoobmenu: Tezisy Dokl. i Soobshch., Minsk, 23–26 Maya 2016 g. Minsk. T. 3* [XV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Abstracts of Presentations and Communications, Minsk, 23–26 May, 2016. Vol. 3]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 424–426 (in Russian).
  25. Kuntyshev V. B., Sukhotskii A. B., Filatov S. O., Zhdanovich A. Yu. (2013) Investigation of the Thermal Conductivity of the External Pollutants of the Heat Exchange Sections of Air Coolers. *Khimicheskaya Tekhnika* [Chemical Engineering], (11), 35–38 (in Russian).
  26. Kuntyshev V. B., Filatov S. O., Korolkova A. M., Dudarev V. V. (2016) The Impact of External Pollutants on the Intensity of Heat Transfer of Air Heat Exchanger Compressor Stations of Main Gas Pipelines. *XV Minskii Mezhdunar. Forum po Teplo- i Massoobmenu: Tezisy Dokl. i Soobshch., Minsk, 23–26 Maya 2016 g. Minsk. T. 3* [XV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Abstracts of Presentations and Communications, Minsk, 23–26 May, 2016. Vol. 3]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 162–163 (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-256-264

УДК 621.565

## **Анализ экономии затрат энергии в криогенных системах за счет использования теплообменных аппаратов**

**А. В. Троценко<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий (Одесса, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Определение экономии затрат энергии вследствие реализации принципа регенерации холода относится к числу трудноразрешимых задач эксергетического анализа криогенных систем. В статье рассмотрен способ оценки экономии затрат энергии, обусловленной наличием в схеме криогенной установки теплообменных аппаратов. Проведены расчеты этой экономии для рефрижераторного и ожижительного режимов работы криогенной азотной установки, работающей по простому дроссельному циклу. Способ нахождения экономии является приближенным. Он показал, что для простого дроссельного цикла использование теплообменного аппарата позволяет уменьшить затраты энергии примерно на 30 % независимо от режима работы установки. При этом применение теплообменника дает возможность избежать проблем, связанных с использованием работы, полученной в детандере. Анализ результатов проведенных вычислений показал, что рассматриваемая экономия практически не зависит от режима работы. Для рассчитанных систем определены минимальные давления рабочего тела после компрессора, необходимые для получения заданного количества продукта требуемого качества. Выполненные для цикла Линде расчеты показали, что эта величина зависит от режима работы установки, но существенно меньше давления в цикле. Представленный подход к определению экономии затрат энергии в низкотемпературных системах, обусловленной наличием в их схемах теплообменных аппаратов, может быть применен и для энергетической установки. Для этого нужно переопределить назначение этих аппаратов и изменить в соответствии с ним уравнения эксергетических балансов.

**Ключевые слова:** эксергетический метод, термодинамический анализ, регенерация холода, теплообменный аппарат, затраты энергии, давление в цикле

**Для цитирования:** Троценко, А. В. Анализ экономии затрат энергии в криогенных системах за счет использования теплообменных аппаратов / А. В. Троценко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 3. С. 256–264. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-256-264

## **Analysis of Energy Consumption Economy in Cryogenic Systems by the Use of Heat Exchangers**

**A. V. Trotsenko<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Odessa National Academy of Food Technologies (Odessa, Ukraine)

**Abstract.** Evaluation of energy consumption economy due to implementation of the principle of cold regeneration is a formidable problem of exergy analysis of cryogenic systems. A method

---

### **Адрес для переписки**

Троценко Александр Владимирович  
Одесская национальная академия  
пищевых технологий  
ул. Дворянская, 1/3,  
65082, г. Одесса, Украина  
Тел.: +38 048 720-91-16  
trotalex@rambler.ru

### **Address for correspondence**

Trotsenko Aleksandr V.  
Odessa National Academy  
of Food Technologies  
1/3, Dvoryanskaya str.,  
65082, Odessa, Ukraine  
Tel.: +38 048 720-91-16  
trotalex@rambler.ru

---

for evaluation of power consumption economy due to the presence of heat exchangers in the scheme of cryogenic plant is suggested in the present article. The calculations of the economy for the refrigeration and liquefaction regimes of cryogenic nitrogen plant operating in accordance with a simple throttle cycle have been carried out. The approximate method for evaluation of power consumption economy demonstrated that for a simple throttle cycle the use of the heat exchanger enables to reduce power costs by about 30 % regardless of the mode of operation. The use of a heat exchanger makes it possible to avoid the problems associated with the use of work produced in the expander. The analysis of the results of the performed calculations demonstrated that the economy is practically independent on the operating regime. For the analyzed systems the minimal pressures of the working fluid after compressor that are needed to obtain a specified quantity of a product of required quality have been determined. The calculations made for Linde cycle demonstrated that this value depends on the mode of operation, but it is significantly less than the pressure in the cycle. The presented approach to determining the economy of energy consumption in low-temperature systems is applicable to power plants due to the presence of heat exchangers in its design. For such an application one need to override the purpose of these devices and to alter the equations exergy balances in accordance with it.

**Keywords:** exergetic method, thermodynamic analysis, cold regeneration, heat exchanger, power consumption, pressure of cycle

**For citation:** Trotsenko A. V. (2017) Analysis of Energy Consumption Economy in Cryogenic Systems by the Use of Heat Exchangers. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 256–264. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-256–264 (in Russian)

## Введение

Теплообменные аппараты – самые распространенные и обязательные элементы любых криогенных установок [1]. В этих установках их основным назначением является внешнее охлаждение прямых потоков высокого давления рабочих тел за счет холода обратных потоков низкого давления, т. е. реализация принципа регенерации холода. Так как всякое охлаждение при температурах, ниже температуры окружающей среды, связано с затратами энергии [2], то наличие теплообменников приводит к уменьшению величины энергии, подводимой извне к низкотемпературной установке. Это уменьшение обычно рассматривается как снижение давления в ее цикле при получении необходимого количества продукта требуемого качества.

Теплообменники относятся к хорошо изученным объектам криогенной техники – как экспериментально, так и теоретически. Именно в криогенике наиболее ярко вырисовывается их роль среди других элементов системы. Термодинамический анализ этих аппаратов (в первую очередь эксергетический) достаточно широко представлен в литературе. Среди множества задач данного направления можно выделить: нахождение составляющих эксергетических потерь в теплообменниках [3, 4]; определение их термодинамической работоспособности [5]; анализ способов восстановления этой работоспособности без изменения схемы цикла [6, 7]; особенности определения их эксергетического КПД [8].

В то же время автору неизвестны работы, в которых бы решалась задача вычисления экономии затрат энергии при использовании теплообменных аппаратов в схемах установок. Без ее решения термодинамический анализ теплообменников, как и всей криогенной установки, вряд ли можно считать полным. Трудность определения этой экономии обусловлена отсутствием в энергетическом балансе аппарата членов, содержащих потоки энергии в форме работы.

Цель исследований – разработка приближенного способа для вычисления уменьшения затрат энергии в низкотемпературной установке при

наличии в ее схеме теплообменных аппаратов и анализ этого способа на примере простого дроссельного цикла.

### Способ определения экономии затрат энергии в двухпоточном теплообменнике

Расчетная схема двухпоточного теплообменника Т изображена на рис. 1. В ней использованы следующие условные обозначения:  $M_m$ ,  $M_n$  – расход прямого и обратного потоков рабочих тел;  $Q_3$  – теплоприток к теплообменнику из окружающей среды.

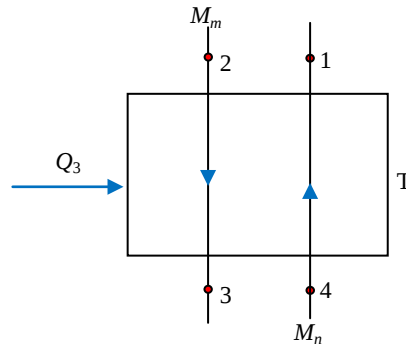


Рис. 1. Схема теплообменного аппарата

Fig. 1. The scheme of the heat exchanger

Как отмечено выше, с рассматриваемым аппаратом не связаны энергетические потоки в форме работы. По этой причине непосредственное применение его энергетического баланса для решения поставленной задачи невозможно, и единственным способом ее вычисления является использование эксергетического баланса. Формальное уравнение эксергетического баланса для теплообменника записывается следующим образом:

$$E_2 + E_4 = E_3 + E_1 + D_e^T, \quad (1)$$

где  $E_i$  – значение полной эксергии рабочего тела в  $i$ -й узловой точке ( $i = 1, 2, 3, 4$ );  $D_e^T$  – потери из-за необратимости процессов в аппарате.

С учетом назначения теплообменника уравнение (1) трансформируется к виду

$$E_4 - E_1 = E_3 - E_2 + D_e^T. \quad (2)$$

Разность  $(E_4 - E_1)$  в левой части равенства (2) представляет собой затраты эксергии обратного потока рабочего тела 4–1, а разность  $(E_3 - E_2)$  – приобретенную эксергию прямого потока 2–3. По своей форме (2) подобно известной зависимости для всего цикла [9]

$$L_r = L_{\min} + D_e^S, \quad (3)$$

где  $L_r$ ,  $L_{\min}$  – действительные и минимальные затраты энергии в системе;  $D_e^S$  – потери эксергии из-за необратимости процессов в этой системе.

Основное различие между (2) и (3) состоит в том, что в первом из них его левая часть представляет собой затраты эксергии, а в правой части со-

держится эффект от этих затрат. В выражении (3) обе его части отображают затраты энергии, хотя по смыслу величина  $L_{\min}$  равна сумме эксергий полученных продуктов. Левую часть (2) можно отождествить с подведенной работой к теплообменнику лишь в случае обратимости процесса 4–1. При отсутствии потерь из-за необратимости в процессе 2–3 возможно считать величину  $(E_3 - E_2)$  минимальными затратами энергии на повышение эксергии прямого потока. В действительности наличие различных видов потерь в теплообменнике не дает возможности строго интерпретировать разности  $(E_3 - E_2)$  и  $(E_4 - E_1)$ . По этой причине задача определения экономии затрат энергии теплообменным аппаратом, как и задача нахождения составляющих потерь в нем, может быть решена лишь приближенно.

Степень этого приближения удобно оценивать величиной эксергетического КПД  $\eta_e$ . Ясно, что чем больше значение  $\eta_e$ , тем больше оснований полагать левую часть (2) в качестве экономии затрат энергии теплообменником. Как отмечено в [10], в реальном теплообменнике всегда имеются собственные (неустраняемые) потери от неравновесного теплообмена между потоками. Поэтому для него имеет место неравенство  $\eta_e < 1$ . В то же время теплообменники относятся к числу наиболее совершенных элементов криогенных установок. Их эксергетические КПД обычно имеют высокие значения, что дает основание далее в первом приближении оценивать экономии энергии разностью эксергий обратного потока на входе и выходе аппарата.

Поскольку аналитически решить рассматриваемую задачу в общем виде не представляется возможным, далее в статье ее анализ будет проводиться исходя из термодинамического расчета простого дроссельного цикла.

### **Экономия затрат энергии в двухпоточном теплообменнике простого дроссельного цикла**

Определение экономии затрат энергии целесообразно производить для конкретных схем установок после проведения их термодинамического расчета. В этом случае имеется возможность сопоставлять между собой действительные и сэкономленные составляющие затрат энергии, исследовать влияние различных параметров и характеристик цикла на величину экономии.

Проанализируем простейшую схему криогенной установки – простой дроссельный цикл (цикл Линде), схема которого представлена на рис. 2. Используются следующие условные обозначения эксергетических потоков:  $L_k$  – энергия, затраченная в компрессоре;  $Q_o$  – теплота, отдаваемая в окружающую среду;  $Q_2, Q_3$  – теплопритоки из окружающей среды к догревателю и теплообменнику соответственно;  $G_k$  – расход рабочего тела через компрессор.

Догреватель представляет собой участок трубопровода, на котором за счет теплоты  $Q_2$  происходит подогрев обратного потока до температуры окружающей среды  $T_{oc}$ , обусловленный недорекуперацией на теплом конце теплообменника  $dT_{1-6} = T_1 - T_6$ . Элемент ступени использования охлаждения (СИО) дает возможность применить этот цикл для описания рефрижераторного  $R$  и ожижительного  $L$  режимов работы установки.

Термодинамический расчет цикла Линде производили для рефрижераторной азотной установки холодопроизводительностью 200 Вт на темпера-

турном уровне охлаждения  $T_x = 80$  К. Основными исходными данными также являлись: температура окружающей среды  $T_{oc} = 293$  К и давление в цикле (после компрессора) 10 МПа. В качестве дополнительных данных, характеризующих технические потери от необратимости процессов, выбрали: недорекуперацию теплообменника  $dT_{1-6} = 8$  К; гидравлические потери по прямому потоку  $dp_{2-3} = p_2 - p_3$  составляли 3 МПа; теплопритоки из окружающей среды  $Q_3 - 5\%$  от тепловой нагрузки теплообменника; изотермический КПД компрессора  $\eta_k = 0,65$ . Гидравлическое сопротивление по обратному потоку  $dp_{5-6} = p_5 - p_6$  определяли как разность давлений на выходе из испарителя и входе в догреватель. Оно составляло 0,03 МПа. Давление в точке 5 соответствовало насыщенному пару при известной температуре  $T_x$ , а в точке 6 равнялось 0,1 МПа. Потерями давления в догревателе пренебрегали.

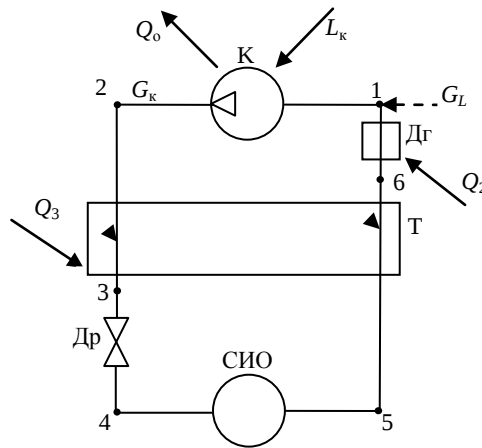


Рис. 2. Схема цикла Линде: К – компрессор; Др – дроссель; Т – теплообменник; СИО – ступень использования охлаждения; Дг – догреватель

Fig. 2. The scheme of the Linde cycle: К – compressor; Др – throttle; Т – heat exchanger; СИО – cooling stage; Дг – preheater

Схемы элементов СИО для различных режимов работы системы изображены на рис. 3, где  $Q_x$  – холодопроизводительность установки;  $G_L$  – расход жидкости, выдаваемый потребителю. В режиме R поток рабочего тела  $G_L$ , подаваемый на всасывание в компрессор и отмеченный на рис. 2 штриховой линией, отсутствует. Узловая точка 0 на рис. 3 и далее определяет состояние насыщенной жидкости.

Результаты термодинамического расчета простого дроссельного цикла отображены в табл. 1, где использованы следующие условные обозначения:  $l_e$ ,  $l_k$  – мольные значения соответственно экономии и затрат энергии;  $\eta_t$  – эксергетический КПД теплообменника. Расчет  $\eta_t$  производили исходя из формального уравнения эксергетического баланса (1) по формуле

$$\eta_t = \frac{E_3 + E_1}{E_2 + E_4}. \quad (4)$$

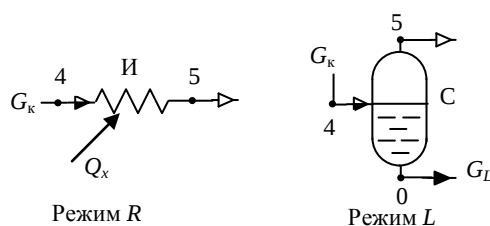


Рис. 3. Схемы ступеней использования охлаждения для различных режимов работы установки: И – испаритель; С – сборник жидкости

Fig. 3. The schemes of using the cooling stages for different operating regimes of cryogenic plant: И – evaporator; С – liquid collector

Таблица 1

Показатели экономии затрат энергии для цикла Линде в рефрижераторном режиме  
Energy consumption economy for the Linde cycle in the refrigeration regime

| Технические потери | $l_e$ , кДж/моль | $l_k$ , кДж/моль | $l_e/l_k$ | $\eta_r$ |
|--------------------|------------------|------------------|-----------|----------|
| Все потери         | 5,84             | 17,55            | 0,33      | 0,787    |
| $dT_{1-6} = 0$     | 5,84             | 17,55            | 0,33      | 0,798    |
| $dp_{2-3} = 0$     | 5,84             | 17,55            | 0,33      | 0,790    |
| $dp_{5-6} = 0$     | 5,12             | 16,45            | 0,31      | 0,828    |
| $\eta_k = 1$       | 5,84             | 11,40            | 0,51      | 0,787    |
| $Q_3 = 0$          | 5,85             | 17,55            | 0,33      | 0,787    |
| Без потерь         | 5,13             | 10,69            | 0,48      | 0,842    |

В первой колонке табл. 1 строка «Все потери» означает, что в расчете учитываются все технические потери, а строка «Без потерь» предполагает учет только собственных потерь в цикле. Каждая из остальных строк таблицы характеризует исключаемый вид технической потери (определяемой соответствующим равенством) при неизменных значениях остальных дополнительных исходных данных.

Как видно из табл. 1, составляющие потерь от необратимости в теплообменнике слабо влияют на экономию затрат, за исключением гидравлического сопротивления обратного потока. Данный факт объясняется принятыми одинаковыми величинами количества и качества продукта во всех вариантах расчетов. Поэтому для обеспечения условия  $dp_{5-6} = 0$  необходимо было принять давление перед компрессором, равным 0,13 МПа, что повлекло уменьшение экономии и затрат энергии, а также увеличение значения  $\eta_r$ .

Наиболее существенный вклад в снижение затрат энергии вносят технические потери в компрессоре, которые определяются величиной  $\eta_k$ . Компрессор в контексте термодинамического расчета можно условно считать изолированным элементом. При постоянствах количества и качества получаемого продукта в рассматриваемой установке, а также фиксированных значений давлений на входе и выходе из компрессора затраты энергии в нем зависят от расхода рабочего тела  $G_k$ . Как показывают проведенные расчеты, величина  $G_k$  практически не зависит от вида исключаемой технической потери.

При исключении всех технических потерь уменьшается значение  $l_e$ , одновременно незначительно увеличиваясь по сравнению с вариантом  $dp_{5-6} = 0$ .

В этом случае затраты энергии  $l_k$  в цикле без технических потерь имеют минимум, а эксергетический КПД – максимум.

Кроме рассмотренной экономии затрат энергии, самостоятельный интерес представляет минимальное давление после компрессора  $p_{2\min}$ , необходимое для получения заданного количества продукта требуемого качества. Это дает возможность оценить, насколько возможное снижение давления в цикле из-за наличия теплообменника приближается к величине  $p_{2\min}$ . Для нахождения значения  $p_{2\min}$  используются:

известное равенство для обратного цикла Карно

$$l_k = q_x \frac{T_{oc} - T_x}{T_x}; \quad (5)$$

выражение для мольной изотермической работы сжатия

$$l_k = T_{oc} (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2), \quad (6)$$

где  $s, h$  – соответственно мольные значения энтропии и энтальпии рабочего тела.

Формулы (5) и (6) совместно с уравнением состояния вещества представляют собой систему, из которой при заданных значениях  $q_x, T_x, T_{oc}, p_1$  находится  $p_{2\min}$ . В общем случае зависимость  $l_k(p_2)$  может быть выявлена из равенства (6) при известных  $T_{oc}$  и  $p_1$ . График этой зависимости при  $p_1 = 0,1$  МПа и расходе  $G_k$ , соответствующем варианту со всеми техническими потерями, представлен на рис. 4.

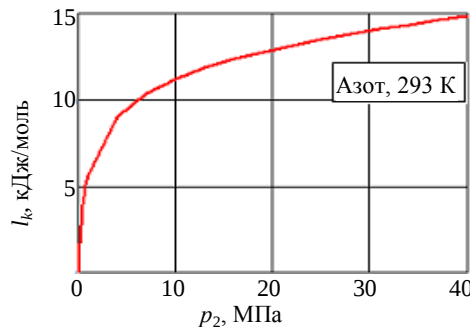


Рис. 4. Зависимость изотермической работы сжатия от давления в цикле

Fig. 4. The dependence of the isothermal compression work on cycle pressure

Трассировкой увеличенного фрагмента графика на рис. 4 установлено, что  $p_{2\min} = 0,13$  МПа. Это незначительно превышает давление на всасывании в компрессор. Таким образом, в данном случае снижение давления, обусловленное теплообменником, не играет определяющей роли для термодинамического совершенства цикла, поскольку  $p_2 \gg p_{2\min}$ .

Анализ экономии затрат энергии теплообменником простого дроссельного цикла в ожижительном режиме производили при тех же основных исходных данных, что и в рефрижераторном режиме. При этом производительность жидкого криопродукта  $G_L$  соответствовала величине полученного холода и рассчитывалась по формуле

$$G_L = Q_x / r, \quad (7)$$

где  $r$  – мольная теплота парообразования азота при давлении в испарителе.

Результаты расчетов для ожижительной установки приведены в табл. 2. Они практически полностью совпадают с данными табл. 1, что может быть объяснено малым значением коэффициента ожижения. Таким образом, в данном случае выводы относительно влияния составляющих потерь от необратимостей процессов на экономию затрат энергии, обусловленную наличием в схеме теплообменного аппарата, практически не зависят от режима работы установки.

Таблица 2

Показатели экономии затрат энергии для цикла Линде в ожижительном режиме

Energy consumption economy for the Linde cycle in the liquefaction regime

| Технические потери | $l_e$ , кДж/моль | $l_k$ , кДж/моль | $l_e/l_k$ | $\eta_T$ |
|--------------------|------------------|------------------|-----------|----------|
| Все потери         | 5,84             | 17,55            | 0,33      | 0,787    |
| $dT_{1-6} = 0$     | 5,84             | 17,55            | 0,33      | 0,797    |
| $dp_{2-3} = 0$     | 5,84             | 17,55            | 0,33      | 0,790    |
| $dp_{5-6} = 0$     | 5,13             | 16,46            | 0,31      | 0,828    |
| $\eta_k = 1$       | 5,84             | 11,40            | 0,51      | 0,787    |
| $Q_3 = 0$          | 5,85             | 17,55            | 0,33      | 0,801    |
| Без потерь         | 5,13             | 10,70            | 0,48      | 0,854    |

Для определения минимальной величины давления после компрессора в режиме  $L$  вместо (5) необходимо использовать выражение

$$l_k = T_{oc}(s_{oc} - s_0) - (h_{oc} - h_0). \quad (8)$$

Решение системы, состоящей из уравнений (6) и (8), и использование графической зависимости на рис. 4 дает возможность установить, что минимальное давление после компрессора для режима  $L$  равно 0,24 МПа, что значительно меньше давления в цикле.

### ВЫВОДЫ

1. Определение экономии затрат энергии вследствие реализации принципа регенерации холода относится к числу трудноразрешимых задач эксергетического анализа криогенных систем. Предложенный способ нахождения этой экономии является приближенным. Он показал, что для простого дроссельного цикла использование теплообменного аппарата позволяет уменьшить затраты энергии примерно на 30 % независимо от режима работы установки. При этом применение теплообменника дает возможность избежать проблем, связанных с использованием работы, полученной в детандере.

2. Самостоятельный интерес представляет задача вычисления минимального давления после компрессора, необходимого для получения заданного количества продукта требуемого качества. Проведенные расчеты для цикла Линде показали, что эта величина зависит от режимов работы установки, но для каждого из них существенно меньше давления в цикле.

3. Представленный подход к определению экономии затрат энергии в низкотемпературных системах, обусловленной наличием в их схемах теплообменных аппаратов, может быть применен и для энергетической установки. Для этого нужно переопределить назначение этих аппаратов и изменить в соответствии с ним уравнения эксергетических балансов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, В. А. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники / В. А. Григорьев, Ю. И. Крохин. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
2. Бродянский, В. М. Термодинамические основы криогенной техники / В. М. Бродянский, А. М. Семенов. М.: Энергия, 1980. 448 с.
3. Троценко, А. В. Метод определения и анализ составляющих эксергетических потерь в теплообменных аппаратах / А. В. Троценко // Технические газы. 2007. № 1. С. 56–62.
4. Троценко, А. В. Предельные эксергетические потери в теплообменном аппарате дроссельной ступени окончательного охлаждения криогенной системы / А. В. Троценко // Технические газы. 2007. № 2. С. 56–60.
5. Троценко, А. В. Анализ работоспособности многопоточных теплообменных аппаратов / А. В. Троценко // Технические газы. 2003. № 2. С. 9–16.
6. Троценко, А. В. Восстановление термодинамической работоспособности двухпоточного теплообменника в цикле высокого давления путем изменения расхода / А. В. Троценко, М. В. Поддубная // Технические газы. 2012. № 1. С. 56–61.
7. Троценко, А. В. Восстановление термодинамической работоспособности теплообменника в цикле высокого давления путем варьирования технических потерь / А. В. Троценко, М. В. Поддубная // Вестник Международной академии холода. 2012. № 3. С. 39–44.
8. Троценко, А. В. Анализ эксергетического КПД как критерия термодинамической эффективности низкотемпературных систем / А. В. Троценко // Технические газы. 2015. № 6. С. 23–30.
9. Архаров, А. М. Криогенные системы: основы теории и расчета / А. М. Архаров, И. В. Марфенина, Е. И. Микунин. М.: Машиностроение, 1988. 454 с.
10. Троценко, А. В. Термодинамическая идеализация процессов и циклов низкотемпературных систем / А. В. Троценко // Технические газы. 2008. № 2. С. 56–61.

Поступила 18.04.2016 Подписана в печать 27.06.2016 Опубликовано онлайн 30.05.2017

## REFERENCES

1. Grigorev V. A., Krokhin Yu. I. (1982) *Heat- and Mass-Exchange Apparatus of Cryogenic Engineering*. Moscow, Energoizdat Publ. 312 (in Russian).
2. Brodyanskii V. M., Semenov A. M. (1980) *Thermodynamic Fundamentals of Cryogenic Engineering*. Moscow, Energiya Publ. 448 (in Russian).
3. Trotsenko A. V. (2007) Method for the Determination and Analysis of the Components of the Exergy Losses in Heat Exchangers. *Tekhnicheskie Gazy* [Technical Gases], (1), 56–62 (in Russian).
4. Trotsenko A. V. (2007) Limit Exergy Losses in the Heat Exchanger of Throttle Stage of Final Cooling of the Cryogenic System. *Tekhnicheskie Gazy* [Technical Gases], (2), 56–60 (in Russian).
5. Trotsenko A. V. (2003) Analysis of Efficiency of Multitflow Heat Exchangers. *Tekhnicheskie Gazy* [Technical Gases], (2), 9–16 (in Russian).
6. Trotsenko A. V. (2012) Recovery Thermodynamic Efficiency of the Dual-Flow Heat Exchanger in the Cycle High Pressure Cycle by Changing the Flow Rate. *Tekhnicheskie Gazy* [Technical Gases], (1), 56–61 (in Russian).
7. Trotsenko A. V., Poddubnaya M. V. (2012) Recovery Thermodynamic Efficiency of the Heat Exchanger in the Cycle High Pressure Cycle by Variation of Technical Losses. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda* [Herald of the International Academy of Refrigeration], (3), 39–44 (in Russian).
8. Trotsenko A. V. (2015) Analysis of Exergy Efficiency as a Criterion of the Thermodynamic Efficiency of Low Temperature Systems. *Tekhnicheskie Gazy* [Technical Gases], (6), 23–30 (in Russian).
9. Arkharov A. M., Marfenina I. V., Mikulin Ye. I. (1988) *Cryogenic Systems: Fundamentals of the Theory and Calculation*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 454 (in Russian).
10. Trotsenko A. V. (2008) Idealized Thermodynamic Processes and Cycles for Low Temperature Systems. *Tekhnicheskie Gazy* [Technical Gases], (2), 56–61 (in Russian).

Received: 18 April 2016

Accepted: 27 June 2016

Published online: 30 May 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275

УДК 537.84

## Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок

О. Н. Лабкович<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Магнитная жидкость является перспективным смазывающим материалом, например в подшипниках скольжения. С помощью магнитной системы магнитная жидкость удерживается в зазоре трения, что существенно упрощает конструкцию системы смазки. Известно, что при течении обычных смазок (минерального масла, воды) в зазоре между цилиндрами с ростом скорости вращения внутреннего цилиндра происходит переход ламинарного течения в вихревое. При этом резко возрастают потери на вязкое трение. Экспериментально исследованы потери на трение в широком интервале скоростей и возможности их снижения при вихревом течении магнитной жидкости в зазоре между цилиндрами. Выявлено, что при достижении безразмерной скорости – числа Тейлора, равного 41,2, – резко увеличивается угол наклона кривой момента трения, вязкие потери тоже возрастают, т. е. происходит смена ламинарного режима течения на вихревой. Средняя температура в слое магнитной жидкости достигает 60 °С. Этот фактор приводит к повышению испарения жидкости-носителя (воды, минерального масла), что снижает ресурс работы смазки – магнитной жидкости. С целью уменьшения вязкого трения при вихревом течении магнитной жидкости в нее вводятся углеродные нанотрубки, представляющие собой цилиндры диаметром до 5,0 нм и длиной около 0,1 мм. Углеродные нанотрубки проявляют упругость при поперечном изгибе: под воздействием нагрузки изгибаются, а после ее снятия восстанавливают первоначальную форму. Они также способны удлиняться вдоль оси на 16 % и после снятия нагрузки возвращаться в исходное положение. Экспериментально получен эффект снижения трения (около 30 %) при вихревом течении магнитной жидкости введением углеродных нанотрубок в магнитные жидкости МНТ-40 и МВ-32. Вероятный механизм уменьшения трения – способность нанотрубок деформироваться под воздействием пульсаций давления и скоростей вихревого потока и частично поглощать часть их энергии. Как показали эксперименты, существует оптимальная весовая концентрация добавки нанотрубок в магнитную жидкость ( $\sim 10^{-4}$ ), при которой наблюдается максимальный эффект снижения трения на 30 %. Таким образом, введение углеродных нанотрубок в смазку (магнитную жидкость) позволяет снижать вязкое трение и соответственно увеличивать диапазон рабочих скоростей, повышать ресурс смазочного узла.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, магнитное поле, однослойные углеродные нанотрубки, вихревое течение

**Для цитирования:** Лабкович, О. Н. Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок / О. Н. Лабкович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 3. С. 265–275. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275

---

### Адрес для переписки

Лабкович Ольга Николаевна  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 14,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 231-64-58  
ftug@bntu.by

---

### Address for correspondence

Labkovich Olga N.  
Belarusian National Technical University  
14 Ya. Kolas str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 231-64-58  
ftug@bntu.by

---

## Reduction of Friction Losses due to the Vortex Flow of the Magnetic Fluid Caused by the Additives of Carbon Nanotubes

O. N. Labkovich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Magnetic fluids are promising lubricating material, in particular, in sliding bearings. With the aid of the magnetic system the magnetic fluid is held in the gap of friction that simplifies the design of the lubrication system sufficiently. It is known that when conventional lubricants (mineral oil, water) flow, with increasing of speed of rotation of the inner cylinder the transition of laminar flow in a vortex takes place. This dramatically increases the viscous friction losses. The friction losses in a wide range of speeds and possibilities of their decrease due to the vortex flow of the magnetic fluid in the gap between the cylinders are experimentally studied. It is revealed that when the dimensionless speed – number of Taylor equal to 41.2 – is reached, the slope of the curve of friction torque sharply increases, viscous losses also increase, i. e. there is a change laminar flow to a vortex one. The average temperature in the layer of the magnetic fluid reaches 60 °C. This factor leads to increased evaporation of the carrier liquid (water, mineral oil), which reduces the service life of the lubricant i.e. the magnetic fluid. In order to reduce viscous friction when a vortex flow of magnetic fluids takes place, carbon nanotubes, which are cylinders with a diameter of 5.0 nm and a length of about 0.1 mm, are brought into the magnetic fluid. Carbon nanotubes demonstrate elasticity under transverse bending: they curve under the impact of load, and after its removal they restore their original shape. They are also able to elongate along the axis by 16 % and to return to its original position after removal of the load. The effect of reducing friction (about 30 %) with a vortex flow of magnetic fluid by the introduction of carbon nanotubes in a magnetic fluid is experimentally obtained. The likely mechanism of friction reduction is the ability of nanotubes to deform under the influence of pressure pulsations and the velocity of the swirling flow, and to absorb partially a part of their energy. As it was experimentally demonstrated, there is an optimum weight concentration of the additive of nanotubes in the magnetic fluid ( $\sim 10^{-4}$ ) that is associated with the maximum effect of reducing friction by 30 %. Thus, the insertion of carbon nanotubes in the lubricant (magnetic fluid) makes it possible to reduce the viscous friction and, consequently, to increase the range of operating speeds, to strengthen the online lubricant site.

**Keywords:** magnetic fluid, magnetic field, single-layered carbon nanotubes, vortex flow

**For citation:** Labkovich O. N. (2017) Reduction of Friction Losses due to the Vortex Flow of the Magnetic Fluid Caused by the Additives of Carbon Nanotubes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 265–275. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275 (in Russian)

### Введение

Магнитные жидкости являются перспективным материалом в качестве смазки, поскольку удерживаются магнитным полем в области трущихся поверхностей [1]. Кроме того, представляет интерес уменьшение трения при течении магнитной жидкости в зазоре между цилиндрами. В [2] показана возможность снижения вязкого трения в магнитной жидкости при введении углеродных наночастиц – фуллеренов  $C_{60}$  – при невысоких скоростях сдвига – до  $10^3 \text{ с}^{-1}$ . Влияние фуллеренов на вязкое трение с ростом

температуры уменьшается от 40 % при температуре 20 °С до 10 % при 60 °С, что ограничивает возможность использования фуллеренов.

Анализ литературы показывает, что снижение диссипативного разогрева может происходить при введении в вихревой поток воды растворов полимеров – полиэтиленоксидов, полиакриламидов, отличающихся большой относительной молекулярной массой (до  $6 \cdot 10^6$ ) и малой долевого концентрации полимера по массе – порядка  $(5 \cdot 10^{-6})$ – $(10 \cdot 10^{-6})$  кг на 1 кг воды. Также применяются поверхностно-активные вещества, имеющие длинноцепочечное строение. Предполагается, что длинноцепочечные молекулы полимеров и поверхностно-активных веществ под воздействием пульсаций давлений и скоростей вихревого течения деформируются, поглощая часть энергии пульсаций, снижая этим интенсивность вихрей. Приведенные выше способы уменьшения вихревого течения получены для воды, данные для масла отсутствуют. Кроме того, с повышением температуры потока до 70 °С, что характерно для систем смазки, эффективность добавок высокомолекулярных полимеров и поверхностно-активных веществ резко уменьшается.

Представляет интерес использование однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в качестве добавок, снижающих вихревое трение. Однослойные углеродные нанотрубки (диаметр до 5,0 нм, длина ~0,1 мм) проявляют высокую упругость при изгибе. Под действием нагрузки в направлении, нормальном к продольной оси, они деформируются, а после снятия нагрузки восстанавливают свою первоначальную форму, т. е. работают как демпфирующее устройство [3–5]. Углеродные нанотрубки также способны удлиняться вдоль оси на 16 % и после снятия нагрузки возвращаться в исходное положение. Таким образом, имеются предпосылки к тому, что ОУНТ смогут эффективно гасить пульсации давления и скоростей вихревого потока, т. е. снижать диссипативный разогрев. Введение немагнитных частиц в магнитную жидкость во внешнем магнитном поле способствует их ориентированию вдоль силовых линий магнитного поля. Это создает дополнительные возможности по управлению ориентацией немагнитных частиц в магнитной жидкости и расширению ее применения.

Автором статьи экспериментально исследовано влияние добавок ОУНТ на вязкое трение при вихревом течении магнитной жидкости между цилиндрами, один из которых вращается.

### Проведение исследований

Исследования проводились на модифицированном вискозиметре НААКЕ Viscotester VT 550. Измерительный узел, представленный на рис. 1, состоял из магнитопровода 1, постоянного кольцевого магнита 2, немагнитного корпуса 3, термостатируемого внешнего цилиндра 4, внутреннего вращающегося цилиндра 8. С помощью термодатчиков 5 и 6 производили контроль температур на поверхностях цилиндров радиусами  $R_2$  и  $R_1$ , образующих радиальный зазор, в котором находилась магнитная жидкость 7.

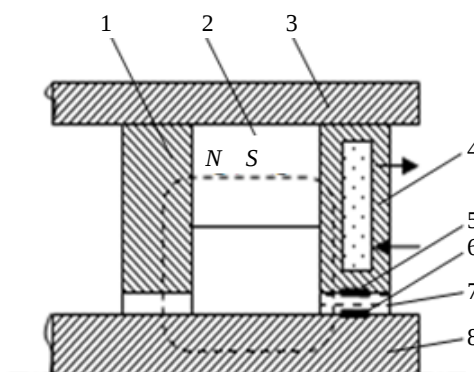


Рис. 1. Измерительный узел

Fig. 1. The measurement site

Момент трения на внутреннем цилиндре  $R_1$  измеряли с помощью торсионного устройства. Погрешность измерения момента не превысила 2 %. Величина радиального зазора ( $r = R_2 - R_1$ ) изменялась от 0,1 до 0,7 мм. Осевой размер слоя магнитной жидкости  $l$  соответствовал 20 мм. Линейная скорость внутреннего цилиндра  $v$  изменялась от 0 до 20 м/с, максимальная скорость сдвига  $\gamma$  была около  $10^5 \text{ с}^{-1}$ . В процессе опыта при разных скоростях сдвига температура магнитной жидкости  $T$  изменялась от 20 до 60 °С.

Магнитная система в исследуемом зазоре создает однородное радиальное магнитное поле  $H$  с максимальной напряженностью 400 кА/м. Исследование осевого распределения магнитного поля показало, что его неоднородность не превышала 6 %.

Использовали магнитные жидкости на трансформаторном масле и магнетите с намагниченностью насыщения 40 кА/м (ММт-40) и на воде и магнетите с намагниченностью насыщения 32 кА/м (МВ-32). С целью повышения устойчивости растворов магнитные жидкости центрифугировали при 6000g и подвергали магнитной сепарации. Кривые намагничивания приведены на рис. 2.

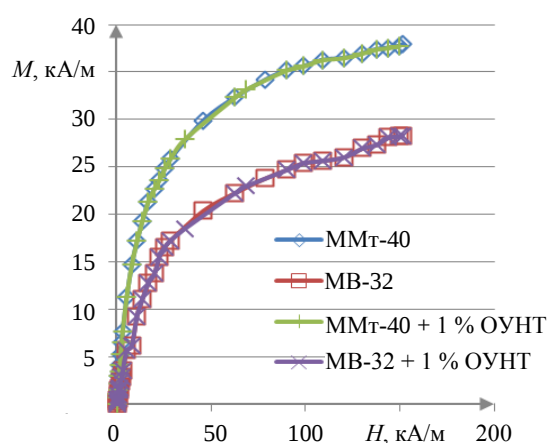


Рис. 2. Кривые намагничивания ММт-40 и МВ-32

Fig. 2. Curves of magnetization of ММт-40 (the magnetic fluid based on transformer oil) and МВ-32 (the water-based magnetic fluid)

Физические свойства магнитных жидкостей при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $H = 0$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Физические свойства магнитных жидкостей

## Physical properties of magnetic fluids

| Магнитная жидкость | Коэффициент вязкости $\eta$ , Па·с | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К) | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Диаметр частиц магнетита $d$ , нм |
|--------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| МВ-32              | 0,0147                             | 0,72                                              | 1200                                 | <15                               |
| ММт-40             | 0,0600                             | 0,18                                              | 1300                                 | <15                               |

С целью снижения потерь на трение в области ламинарного и вихревого течений в качестве добавок в магнитную жидкость диспергированием вводили ОУНТ. Они представляют собой полые немагнитные цилиндры диаметром до 5 нм и длиной 0,005–0,120 мм. Исследования показали, что малые добавки немагнитных ОУНТ с весовой концентрацией от 1,000 до 0,001 % в магнитные жидкости не оказывали влияния на их намагниченность (рис. 2).

Важной особенностью магнитной жидкости с введенными в нее немагнитными нанотрубками является то, что внешнее магнитное поле оказывает ориентирующее действие на нанотрубки. Установлено, что внешнее магнитное поле действует на немагнитную частицу в магнитной жидкости с силой, пропорциональной квадрату намагниченности жидкости [6]. В результате воздействия поля в магнитной жидкости возможно образование упорядоченных структур из нанотрубок.

Выполнено исследование структурирования нанотрубок в магнитной жидкости в магнитном поле. Для этого готовили растворы жидкостей, которые наносили на прозрачную стеклянную подложку тонким слоем и высушивали как при отсутствии, так и в присутствии магнитного поля. Затем исследовали их с помощью электронного микроскопа Primo Star.

В отсутствие магнитного поля ОУНТ расположены хаотически. Это хорошо видно на фотографии образца магнитной жидкости МВ-32 с добавкой однослойных углеродных нанотрубок, приведенной на рис. 3.

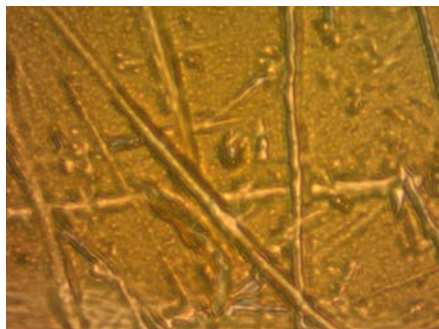


Рис. 3. Фотография частиц однослойных углеродных нанотрубок в магнитной жидкости МВ-32 без магнитного поля ( $\times 10^{10}$ )

Fig. 3. Photograph of single-layered carbon nanotubes particles in the magnetic fluid MV-32 without the magnetic field ( $\times 10^{10}$ )

Фотографии образцов магнитной жидкости МВ-32 с добавкой ОУНТ представлены на рис. 4 и 5. При выдержке образцов в магнитном поле ( $H = 400$  кА/м) однослойные углеродные нанотрубки ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля. В этом случае при небольшой их концентрации ( $c = 10^{-5}$ ) они образуют дискретные структуры, как изображено на рис. 4.

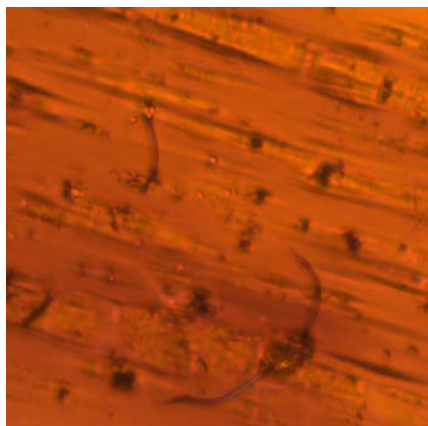


Рис. 4. Фотография позиционирования однослойных углеродных нанотрубок ( $c = 10^{-5}$ ) в МВ-32 магнитным полем ( $\times 10^4$ )

*Fig. 4. Photograph of positioning of single-layered carbon nanotubes ( $c = 10^{-5}$ ) in the magnetic fluid MV-32 by magnetic field ( $\times 10^4$ )*



Рис. 5. Фотография позиционирования однослойных углеродных нанотрубок ( $c = 10^{-4}$ ) в МВ-32 магнитным полем ( $\times 10^4$ )

*Fig. 5. Photograph of positioning of single-layered carbon nanotubes ( $c = 10^{-4}$ ) in the magnetic fluid MV-32 by magnetic field ( $\times 10^4$ )*

В нижней части рис. 4 и в середине слева видны дуги, расположенные поперек силовых линий магнитного поля – это многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), которые обладают более жесткими механическими свойствами. Поэтому силы магнитного поля ( $H = 400$  кА/м) не достаточно для их позиционирования в направлении поля.

Исследования положения ОУНТ производили при разных концентрациях. Установлено, что при увеличении весовой концентрации ОУНТ до  $c = 10^{-4}$  они образуют длинноцепочечные структуры вдоль магнитного поля. Это хорошо видно на рис. 5.

На процесс образования структур влияет вязкость магнитной жидкости, которая является основой суспензии. Поэтому была изучена вязкость магнитной жидкости как без добавок однослойных углеродных нанотрубок, так и с добавками ОУНТ, а также определена ее температурная зависимость. В процессе проведения опыта полученные данные показали зависимость динамического коэффициента вязкости магнитных жидкостей от температуры, которая определялась их основой (трансформаторным маслом и водой) (рис. 6). Приведенные на рис. 6 данные получены в отсутствие магнитного поля.

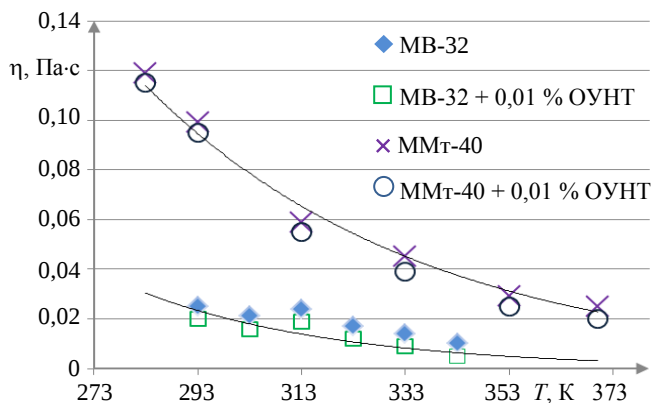


Рис. 6. Температурная зависимость вязкости магнитных жидкостей и суспензий на их основе

Fig. 6. Temperature dependence of viscosity of magnetic fluids and suspensions based on them

В отсутствие магнитного поля добавка однослойных углеродных нанотрубок в магнитную жидкость в диапазоне концентраций  $c$  от  $10^{-2}$  до  $10^{-6}$  не оказала влияния на вязкость жидкости, что может объясняться их деформацией в потоке. В ряде работ [7, 8] показано, что течение воды и минерального масла в зазоре между цилиндрами при вращении внутреннего цилиндра и условиях, близких к условиям данного исследования (величина радиального зазора 0,127 мм, 0,225 мм), с повышением скорости переходит из ламинарного в вихревое. Смена режима течения осуществляется при критическом числе Тейлора, равном 41,2. Здесь число Тейлора определено как

$$Ta = Re \left( \frac{r}{R_1} \right)^{0.5},$$

где  $Re = \frac{rV}{\nu}$ ;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости.

Необходимо отметить, что вода и минеральное масло использовались в качестве жидкостей-носителей при изготовлении магнитных жидкостей, применяемых в проводимых экспериментах. Поэтому аналогии с результатами приведенных выше работ являются вполне корректными.

Критическое число  $Ta$  определяли из зависимости момента трения от линейной скорости цилиндра. При критическом числе  $Ta$  происходит резкое увеличение угла наклона кривой измеряемого момента трения, т. е. переход ламинарного течения жидкости в вихревое. Вихри Тейлора наблюдались авторами [7] визуальными и подтверждались возникновением радиальных пульсаций скоростей, зафиксированных пленочным термоанемометром.

В [9] численно исследовалось куэттовское течение магнитной жидкости в поперечном магнитном поле при высоких скоростях сдвига. При выпол-

нении ее диссипативного разогрева показано, что учет теплового и реологического факторов (изменение вязкости от магнитного поля) может привести к возникновению участков с неустойчивым течением магнитной жидкости.

На установке, изображенной на рис. 1, были получены зависимости момента трения от линейной скорости внутреннего цилиндра  $v$ , необходимые для определения характера течения магнитной жидкости. Эти зависимости для безразмерной скорости (числа Тейлора) приведены на рис. 7. При небольших скоростях вращения ( $Ta < 35$ ) зависимость момента трения от скорости носит линейный характер, что свидетельствует о ламинарном течении магнитных жидкостей.

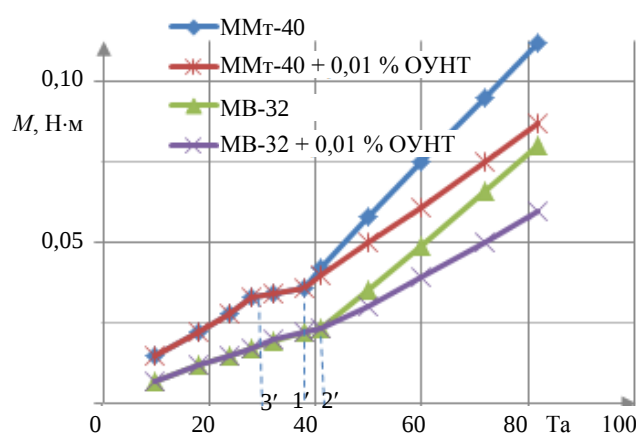


Рис. 7. Зависимость момента трения от числа Тейлора

Fig. 7. The dependence of friction torque on the number of Taylor

С повышением скорости экспериментально обнаружено резкое увеличение угла наклона кривой момента трения (числа  $Ta$ , соответствующие точкам 1' и 2'), что, согласно результатам [7, 8], свидетельствует о переходе ламинарного течения в вихревое. Критическое число Тейлора (точка 2') для магнитной жидкости МВ-32 соответствует его классическому значению 41,2. В то же время критическое число Тейлора для магнитной жидкости на основе трансформаторного масла ММт-40 оказалось меньше классического на 15 %.

Для ММт-40 (рис. 7) при числе  $Ta$ , соответствующем точке 3', момент трения не изменяется до значения числа  $Ta$ , соответствующего точке 1', после которого происходит резкое увеличение угла наклона. Согласно [9], в данной области течение магнитной жидкости неустойчиво, а это может привести к более раннему образованию вихревого течения. При этом перепад температур между цилиндрами составлял 12 °С, что приводило к изменению вязкости в радиальном направлении; течение магнитной жидкости, по мнению авторов [9], становилось неустойчивым.

Течения суспензий магнитных жидкостей ММт-40 и МВ-32 с добавками ОУНТ исследовали в диапазоне весовых концентраций  $c$  от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$ .

Влияние концентрации однослойных углеродных нанотрубок  $c$  на относительный коэффициент трения  $c_{f1}/c_f$  (где  $c_{f1}$  – коэффициент трения с добавкой ОУНТ) показано на рис. 8.

Коэффициент трения без добавки ОУНТ определяли из выражения

$$c_f = \frac{\tau}{\frac{\rho v^2}{2}} = \frac{M_{\text{тр}}}{\pi \frac{\rho}{2} v^2 R_1^2 l},$$

где  $M_{\text{тр}}$  – измеренный момент трения;  $l$  – осевой размер слоя магнитной жидкости (20 мм);  $\rho$  – плотность магнитной жидкости;  $v$  – линейная скорость внутреннего цилиндра;  $R_1$  – момент трения на внутреннем цилиндре.

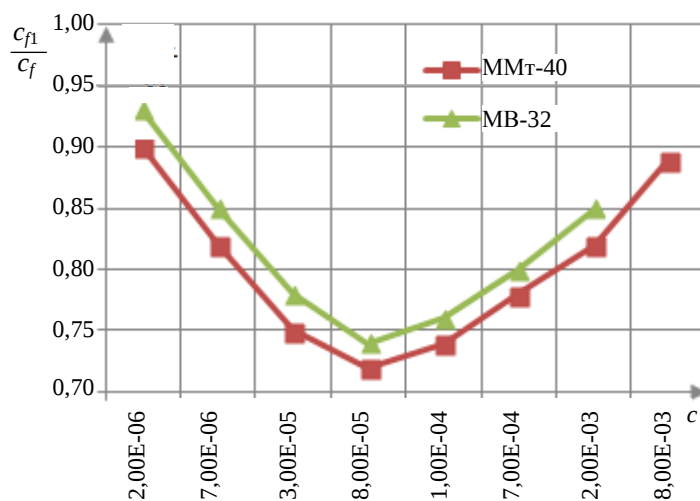


Рис. 8. Зависимость эффекта снижения трения от концентрации однослойных углеродных нанотрубок

Fig. 8. The dependence of the effect of reducing friction on the concentration of single-layered carbon nanotubes

Коэффициент трения снижался в области вихревого течения, причем наибольший эффект уменьшения трения достигается при концентрации однослойных углеродных нанотрубок  $c \sim 10^{-4}$  (или 0,01 %). Эффективность влияния добавок оценивали относительным коэффициентом трения. В данном случае образуются длинные структуры из ОУНТ, изображенные на рис. 5. В радиальном магнитном поле ( $H = 400$  кА/м) эти структуры выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля, т. е. в радиальном направлении. При вращении внутреннего цилиндра под влиянием конкурирующего воздействия магнитных и гидродинамических сил с увеличением скорости происходит ориентация ОУНТ и их структур в направлении потока. С ростом скорости возникает вихревое течение ( $Ta > Ta_{кр}$ ), при котором наблюдаются радиальные пульсации скоростей [7] и, как следствие, – резкое увеличение потерь на трение. Вероятно, в рассматриваемом случае радиальные пульсации скоростей, воздействуя на однослойные углеродные нанотрубки, которые осью направлены по потоку, деформи-

руют их, теряя часть своей энергии, что уменьшает интенсивность их пульсаций и в конечном итоге приводит к снижению потерь на трение. При рассмотрении механизма воздействия ОУНТ на вихревой поток возможны аналогии с влиянием малых добавок высокомолекулярных полимеров при вихревых течениях воды [10], в том числе и для течений в зазоре между цилиндрами [11]. В этих случаях наблюдали существенное снижение потерь на трение, что, по мнению автора, связано с деформацией и разрушением длинноцепочечных молекул полимеров в вихревых потоках.

С увеличением скорости в области вихревого течения эффективность добавок однослойных углеродных нанотрубок повышается. Это объясняется ростом интенсивности вихревого движения и соответственно повышением эффективности демпфирующего воздействия ОУНТ на поток, что показано на рис. 9. Измеренные при этом средние температуры в слое магнитной жидкости не превышали 60 °С. На рис. 9 приведены данные для магнитного поля напряженностью 400 кА/м.

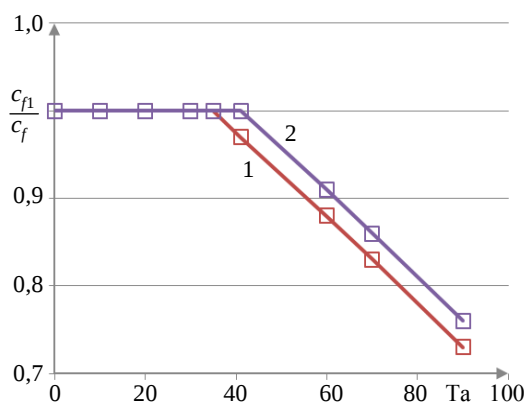


Рис. 9. Зависимость эффективности добавок однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от числа Тейлора: 1 – ММт-40 + 0,01 % ОУНТ; 2 – МВ-32 + 0,01 % ОУНТ

Fig. 9. The dependence of the efficiency of additives of single-layered carbon nanotubes (SLCN) on the number of Taylor: 1 – ММт-40 + 0,01 % SLCN; 2 – МВ-32 + 0,01 % SLCN

## ВЫВОДЫ

1. Внешним магнитным полем в магнитной жидкости можно позиционировать немагнитные однослойные углеродные нанотрубки.
2. Добавки в магнитную жидкость однослойных углеродных наночастиц приводят к снижению трения при вихревом течении магнитной жидкости в зазоре между цилиндрами при средних температурах в зазоре до 60 °С.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берковский, Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. М.: Химия, 1989. 240 с.
2. Лабкович, О. Н. Влияние углеродных наночастиц на эффективную вязкость магнитных жидкостей / О. Н. Лабкович, Л. В. Сулоева, В. А. Чернобай // Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. трудов II всерос. науч. конф. Ставрополь: Ставроп. гос. ун-т, 2009. С. 139–142.

3. Харрис, П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Новые материалы XXI века / П. Харрис. М.: Техносфера, 2003. 336 с.
4. Елецкий, А. В. Механические свойства углеродных нанотрубок и материалов на их основе / А. В. Елецкий // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 225–261.
5. Раков, Э. Г. Нанотрубки и фуллерены / Э. Г. Раков. М.: Логос, 2006. 376 с.
6. Кашевский, Б. Э. Магнитореологический эффект в суспензии с активной несущей жидкостью / Б. Э. Кашевский, В. И. Кордонский, И. В. Прохоров // Магнитная гидродинамика. Нью-Йорк, 1988. Т. 24, № 1. С. 30–35.
7. Frene, J. Detection of Taylor Vortex Transition in Very Small Clearances by Hot Film Anemometry / J. Frene, V. Godef // Tribology. 1973. Vol. 6, No 5. P. 178–183.
8. Ли, С. Влияние переменных плотности и вязкости на изменение режима течения между двумя концентрическими вращающимися цилиндрами / С. Ли // Проблемы трения. Сер. F. 1978. Т. 100, № 2. С. 261–270.
9. Кашевский, Б. Э. Куэттовское течение магнитной жидкости с переменными коэффициентами: вязкие напряжения, разогрев, устойчивость / Б. Э. Кашевский, В. А. Новиков // Магнитная гидродинамика. Нью-Йорк, 1986. Т. 22, № 4. С. 366–372.
10. Лэндал, М. Т. Влияние добавок на динамику турбулентных выбросов / М. Т. Лэндал // Снижение вязкого трения: сб. докл. симпозиума. М.: Машиностроение, 1984. С. 312–325.
11. Симоненко, А. П. Турбулентное течение водных растворов мицеллообразующих ПАВ в зазоре между коаксиальными цилиндрами / А. П. Симоненко // Инженерно-физический журнал. 1980. Т. 38, № 2. С. 231–234.

Поступила 27.06.2016 Подписана в печать 29.08.2016 Опубликовано онлайн 30.05.2017

#### REFERENCES

1. Berkovsky B. M., Medvedev V. F., Krakov M. S. (1989) *Magnetic Fluids*. Moscow, Khimiya Publ. 240 (in Russian).
2. Labkovich O. N., Suloyeva L. V., Chernobai V. A. (2009) The Effect of Carbon Nanoparticles on the Effective Viscosity of Magnetic Fluids. *Fiziko-Khimicheskie i Prikladnye Problemy Magnitnykh Dispersnykh Nanosistem: Sb. Nauch. Tr. II Vseros. Nauch. Konf.* [Physical-and-Chemical and Applied Problems of Magnetic Disperse Nanosystems. Collected Works of the II<sup>nd</sup> All-Russian Scientific Conference]. Stavropol, Stavropol State University, 139–142 (in Russian).
3. Harris P. (2003) *Carbon Nanotubes and Related Structures. New Materials of the XXI<sup>st</sup> Century*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 336 (in Russian).
4. Eletsii A. V. (2007) Mechanical Properties of Carbon Nanostructures and Related Materials. *Physics-Uspekhi*, 177 (3), 225–261. DOI: 10.1070/PU2007v050n03ABEH006188.
5. Rakov E. G. (2006) *Nanotubes and Fullerenes*. Moscow, Logos Publ. 376 (in Russian).
6. Kashevskii B. E., Kordonskii V. I., Prokhorov I. V. (1988) Magnetorheological Effect in a Suspension with an Active Carrier Fluid. *Magnetohydrodynamics, New York*, 24 (1), 30–35.
7. Frene J., Godef V. (1973) Detection of Taylor Vortex Transition in Very Small Clearances by Hot Film Anemometry. *Tribology*, 6 (5), 178–183. DOI: 10.1016/0041-2678(73)90144-9.
8. Li S. (1978) The Influence of Variable Density and Viscosity on flow Transition between Two Concentric Rotating Cylinders. *Journal of Lubrication Technology. Transactions of the ASME. Ser. F*, 100 (2), 261–270. DOI: 10.1115/1.3453159.
9. Kashevskii B. E., Novikov V. A. (1986) Couette Flow of a Magnetic Liquid with Variable Parameters: Viscous Stresses, Heating and Stability. *Magnetohydrodynamics, New York*, 22 (4), 366–372.
10. Lendal M. T. (1984) Influence of Additives on the Dynamics of Turbulent Emissions. *Reducing Viscous Friction. Collected Presentations Symposium*. Moscow, Mashinostroenie, 312–325 (in Russian).
11. Simonenko A. P. (1980) Turbulent Flow of Aqueous Solutions of Surfactants Forming Micelles in the Gap between Coaxial Cylinders. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 38 (2), 231–234 (in Russian).

Received: 27 June 2016

Accepted: 29 August 2016

Published online: 30 May 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-276-286

УДК 338.49

## Регламентирование деятельности блок-станций на традиционных видах топлива

Т. Г. Зорина<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный экономический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Статья посвящена проблеме регламентирования деятельности блок-станций на традиционных видах топлива. Целью являлась разработка мер по ограничению влияния блок-станций на Белорусскую энергосистему, поскольку их деятельность имеет негативные экономические последствия. При выполнении исследования были использованы такие методы, как системный анализ, метод аналогий и учета затрат. Проведена сравнительная характеристика энергопроизводства в типовой рабочий день отопительного периода 2013 и 2014 гг. в разрезе конденсационных электростанций, теплоэлектроцентралей и блок-станций. Рассчитан потенциальный ущерб, наносимый блок-станциями энергосистеме, сделан анализ существующих в Республике Беларусь ограничений негативного влияния блок-станций. Разработан комплекс мер в рамках политики регламентирования деятельности блок-станций на традиционных видах топлива: плата за горячий резерв, необходимый энергосистеме в случае отказа работы блок-станции; плата за диспетчеризацию; плата за передачу и распределение. Преимуществами от принятия предлагаемых мер являются: качественный рост энергоэффективности электроэнергетики; снижение себестоимости электрической энергии в целом по энергосистеме; стимулирование рыночных элементов в электроэнергетике; возможность достаточно быстро реагировать на изменение экономических условий.

**Ключевые слова:** блок-станция, установленная мощность, график нагрузки, перерасход топлива, плата за горячий резерв, плата за диспетчеризацию, плата за передачу и распределение, Белорусская энергосистема, отпуск электрической энергии, теплоэлектроцентраль, конденсационная электростанция

**Для цитирования:** Зорина, Т. Г. Регламентирование деятельности блок-станций на традиционных видах топлива / Т. Г. Зорина // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 3. С. 276–286. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-276-286

## Function Regulation of Customer's Plant that Burn Traditional Types of Fuel

T. G. Zoryna<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State Economic University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** This article deals with the issue of function regulation of customer's plants that burn traditional types of fuel. Its aim was to develop certain measures for reducing customer's plants

---

**Адрес для переписки**  
Зорина Татьяна Геннадьевна  
Белорусский государственный  
экономический университет  
просп. Партизанский, 26,  
220070, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 209-88-88  
tanyazorina@tut.by

---

**Address for correspondence**  
Zoryna Tatyana G.  
Belarus State  
Economic University  
26 Partizansky Ave.,  
220070, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 209-88-88  
tanyazorina@tut.by

---

influence on the Belarusian power supply system as their activity has unfavorable economic consequences. The following methods were used in the present research: the system analysis, the method of analogies and expenses calculation. The article presents the comparative characteristics of the power production during the typical working day of the heating period in the years 2013 and 2014 in terms of condensation power plants, central heating and power plants and customer's plants. The potential damage caused by the customer's plants to the power supply system has been calculated, the restrictions for the customer's plants activity existing in the Republic of Belarus nowadays has been analyzed. The author has developed a number of measures within the framework of regulation policy of the activity of customer's plants that burn traditional types of fuel: the fee for the spinning reserve necessary for the power supply system in case of the customer's plants breakdown; the fee for the supervisory control; the fee for the service of transfer and distribution. The introduction of the proposed measures is supposed to bring the following advantages: high-quality growth of energy efficiency of the power industry; prime cost reduction of power energy in the power supply system as a whole; stimulation of market elements implementation in the power industry; the ability to react fairly fast to the alterations of economic conditions.

**Keywords:** customer's plant, installed power, load curve, fuel overconsumption, fee for hot spare, fee for dispatching, fee for transmission and distribution, Belarusian power supply system, electric power dispensing, power-and-heating plant, condensing power plant

**For citation:** Zoryna T. G. (2017) Function Regulation of Customer's Plant that Burn Traditional Types of Fuel. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 276–286. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-276–286 (in Russian)

## Введение

Разнообразным аспектам функционирования блок-станций посвящены работы отечественных ученых. В частности, Е. П. Забелло и В. А. Тополев изучают режимы работы блок-станций с точки зрения соблюдения их интересов и интересов энергосистемы [1], Л. И. Филатова исследует тарифную политику на электрическую энергию, приобретаемую у блок-станций [2], Б. Г. Дегиль рассматривает порядок включения блок-станции в сеть энергосистемы и технические требования энергоснабжающей организации при подключении блок-станции к ее сети [3], И. В. Солодухо выделяет проблемы во взаимодействии блок-станций и энергосистемы [4], Ф. Молочко и А. Молочко анализируют затраты энергосистемы на содержание заявленного резерва мощности, необходимого для компенсации аварийного отключения блок-станции [5].

В настоящее время параллельно с энергосистемой функционируют когенерационные блок-станции, установленные на предприятиях и в организациях других отраслей экономики. Избытки вырабатываемой ими электроэнергии могут продаваться энергосистеме. Таким образом, в отношении интеграции блок-станций в Белорусскую энергосистему можно выделить ряд проблем:

- неконтролируемая в ряде случаев выдача не востребовавшей мощности в энергосистему в ночные часы суток;
- необходимость поддержания энергосистемой горячего резерва мощности, компенсирующего возможное прекращение поставок электрической энергии от блок-станций;
- недостаточное количество реальных рычагов воздействия со стороны энергосистемы на владельцев блок-станций.

Целью исследования является разработка мероприятий по ограничению влияния блок-станций на Белорусскую энергосистему. В ходе реализации данной цели должны быть решены следующие задачи:

- оценить ущерб Белорусской энергосистемы от отпуска электроэнергии в сеть блок-станциями;
- провести анализ существующих мер, регулирующих деятельность блок-станций;
- разработать экономические меры, позволяющие обеспечить сбалансированную работу блок-станций в рамках Белорусской энергосистемы.

### Основная часть

В процессе выполнения исследований использовали такие методы, как системный анализ, метод аналогий и учета затрат. Информационной базой послужили данные, предоставленные ГПО «Белэнерго». Информация о работе блок-станций за 2010–2014 гг. [6] представлена в табл. 1

Таблица 1

Информация о работе блок-станций за 2010–2014 гг.

Data on customer's plants functioning in 2010–2014

| Год  | Установленная мощность, МВт | Выработка, тыс. кВт·ч | Отпуск в сеть, тыс. кВт·ч |
|------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 2010 | 453,7                       | 2327269,1             | 575132,7                  |
| 2011 | 497,7                       | 2456933,4             | 653539,1                  |
| 2012 | 558,4                       | 2697068,4             | 568638,1                  |
| 2013 | 635,8                       | 2920563,4             | 609004,2                  |
| 2014 | 718,1                       | 3114200,5             | 643043,4                  |

Как следует из табл. 1, в 2014 г. мощность блок-станций в Республике Беларусь увеличилась в 1,58 раза по сравнению с 2010-м, а отпускаемая в сеть электрическая энергия – в 1,12 раза. Потенциальный ущерб, наносимый блок-станциями энергосистеме, можно оценить по следующим критериям.

1. Изменение максимальной выдачи в сеть мощности от блок-станций в ночное время отопительного периода

$$\Delta N_{\max} = N_{1\max} - N_{0\max}, \quad (1)$$

где  $\Delta N_{\max}$  – изменение максимальной выдачи в сеть мощности от блок-станций в ночное время отопительного периода, МВт;  $N_{1\max}$  – максимальная выдача в сеть мощности от блок-станций в ночное время отчетного отопительного периода, МВт;  $N_{0\max}$  – максимальная выдача в сеть мощности от блок-станций в ночное время базисного отопительного периода, МВт.

График нагрузки Белорусской энергосистемы в типовой рабочий день в декабре 2014 г. представлен на рис. 1.

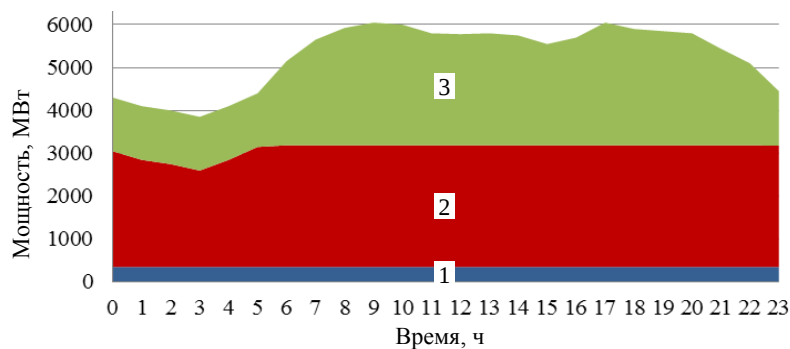


Рис. 1. График нагрузки Белорусской энергосистемы в типовой рабочий день в декабре 2014 г.: 1 – генерация блок-станциями; 2 – то же теплоэлектроцентралями; 3 – то же конденсационными электростанциями

Fig. 1. Load curve of the Belarusian power supply system during a typical working day in December, 2014: 1 – production by customer's plants; 2 – production by power-and-heating plants; 3 – production by condensing power plants

Как видно из рис. 1, максимальная выдача в сеть мощности от блок-станций в ночное время отопительного периода 2014 г. составила 348 МВт.

График нагрузки Белорусской энергосистемы в типовой рабочий день в декабре 2013 г. представлен на рис. 2.

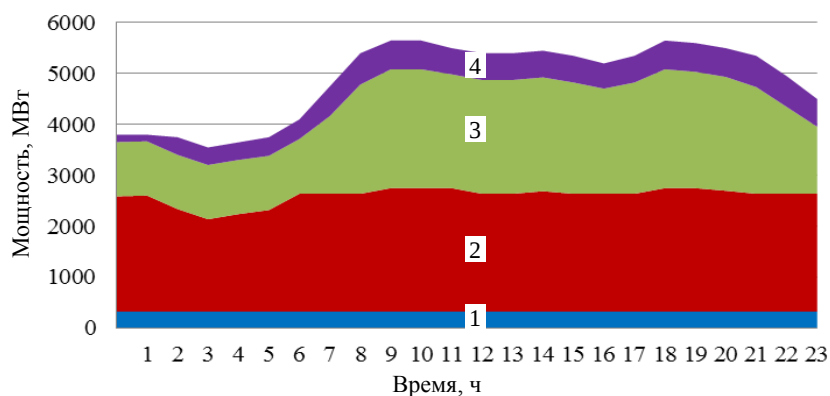


Рис. 2. График нагрузки Белорусской энергосистемы в типовой рабочий день в декабре 2013 г.: 1 – генерация блок-станциями; 2 – то же теплоэлектроцентралями; 3 – то же конденсационными электростанциями; 4 – импорт

Fig. 2. Load curve of the Belarusian power supply system during a typical working day in December, 2013: 1 – production by customer's plants; 2 – production by power-and-heating plants; 3 – production by condensing power plants; 4 – import

Согласно рис. 2, максимальная выдача в сеть мощности от блок-станций в ночное время отопительного периода 2013 г. составила 325 МВт.

Таким образом, изменение максимальной выдачи в сеть мощности от блок-станций в ночное время отопительного периода в 2014 г. по сравнению с 2013 г. составило

$$\Delta N_{\max} = 348 - 325 = 23 \text{ МВт.}$$

2. Перерасход топлива на станциях Белорусской энергосистемы при замещении собственной выработки покупкой электрической энергии от блок-станций, использующих традиционные виды топлива, в ночное время отопительного периода:

$$\Delta b_{\max} = \frac{B_{\text{КЭС}}^{\max} + B_{1\text{ТЭЦ}}^{\max} + B_{6-\text{с}}^{\max}}{\mathcal{E}_{\text{КЭС}}^{\max} + \mathcal{E}_{1\text{ТЭЦ}}^{\max} + \mathcal{E}_{16-\text{с}}^{\max}} - \frac{B_{\text{КЭС}}^{\max} + B_{2\text{ТЭЦ}}^{\max}}{\mathcal{E}_{\text{КЭС}}^{\max} + \mathcal{E}_{2\text{ТЭЦ}}^{\max}}; \quad (2)$$

$$\Delta b_{\min} = \frac{B_{\text{КЭС}}^{\min} + B_{1\text{ТЭЦ}}^{\min} + B_{6-\text{с}}^{\min}}{\mathcal{E}_{\text{КЭС}}^{\min} + \mathcal{E}_{1\text{ТЭЦ}}^{\min} + \mathcal{E}_{16-\text{с}}^{\min}} - \frac{B_{\text{КЭС}}^{\min} + B_{2\text{ТЭЦ}}^{\min}}{\mathcal{E}_{\text{КЭС}}^{\min} + \mathcal{E}_{2\text{ТЭЦ}}^{\min}}, \quad (3)$$

где  $\Delta b_{\max}$ ,  $\Delta b_{\min}$  – максимальное и минимальное изменение удельного расхода топлива при включении в энергосистему блок-станций в ночное время отопительного периода, г у. т./((кВт·ч);  $B_{\text{КЭС}}^{\max}$ ,  $B_{\text{КЭС}}^{\min}$  – расход топлива на конденсационных электростанциях (КЭС) в момент максимальной и минимальной нагрузки блок-станций в ночное время отопительного периода, г у. т./((кВт·ч);  $B_{1\text{ТЭЦ}}^{\max}$ ,  $B_{1\text{ТЭЦ}}^{\min}$  – расход топлива на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) в момент максимальной и минимальной нагрузки блок-станций в ночное время отопительного периода, г у. т./((кВт·ч);  $B_{6-\text{с}}^{\max}$ ,  $B_{6-\text{с}}^{\min}$  – то же на блок-станциях в момент их максимальной и минимальной нагрузки в ночное время отопительного периода, г у. т./((кВт·ч);  $B_{2\text{ТЭЦ}}^{\max}$ ,  $B_{2\text{ТЭЦ}}^{\min}$  – то же на ТЭЦ в момент максимальной и минимальной нагрузки блок-станций в ночное время отопительного периода в условиях замещения работы блок-станций горячим резервом, г у. т./((кВт·ч);  $\mathcal{E}_{\text{КЭС}}^{\max}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{КЭС}}^{\min}$  – выработка электрической энергии на КЭС в момент максимальной и минимальной нагрузки блок-станций в ночное время отопительного периода, кВт·ч;  $\mathcal{E}_{1\text{ТЭЦ}}^{\max}$ ,  $\mathcal{E}_{1\text{ТЭЦ}}^{\min}$  – то же на ТЭЦ в момент максимальной и минимальной нагрузки блок-станций в ночное время отопительного периода, кВт·ч;  $\mathcal{E}_{16-\text{с}}^{\max}$ ,  $\mathcal{E}_{16-\text{с}}^{\min}$  – максимальный и минимальный отпуск электрической энергии от блок-станций в сеть в ночное время отопительного периода, кВт·ч;  $\mathcal{E}_{2\text{ТЭЦ}}^{\max}$ ,  $\mathcal{E}_{2\text{ТЭЦ}}^{\min}$  – выработка электрической энергии на ТЭЦ в момент максимальной и минимальной нагрузки блок-станций в ночное время отопительного периода в условиях замещения работы блок-станций горячим резервом, кВт·ч.

По мнению экспертов, перерасход топлива на станциях энергосистемы при замещении собственной выработки покупкой электрической энергии от блок-станций, использующих в качестве топлива природный газ и продукты перегонки нефти, составляет от 0,3 до 1,2 г у. т./(кВт·ч) в зависимости от режимов работы оборудования [4].

3. Дополнительные затраты на топливо в энергосистеме, возникающие в результате функционирования блок-станций:

$$Z_{\text{топл}}^{\text{доп}} = \overline{\Delta b} \cdot \Xi_{\text{б-с}}^{\text{год}} \frac{Z_{\text{топл}}^{\text{год}}}{B^{\text{год}}}, \quad (4)$$

где  $Z_{\text{топл}}^{\text{доп}}$  – дополнительные затраты на топливо в энергосистеме, возникающие в результате функционирования блок-станций, бел. руб.;  $\overline{\Delta b}$  – среднее изменение удельного расхода топлива при включении в энергосистему блок-станций в ночное время отопительного периода, г у. т./(кВт·ч);  $\Xi_{\text{б-с}}^{\text{год}}$  – годовой отпуск электрической энергии от блок-станций в сеть, кВт·ч;  $Z_{\text{топл}}^{\text{год}}$  – годовые затраты на топливо на ТЭЦ, бел. руб.;  $B^{\text{год}}$  – годовой расход топлива на ТЭЦ, г у. т./(кВт·ч).

Дополнительные затраты на топливо в энергосистеме по формуле (4), возникающие в результате функционирования блок-станций, были рассчитаны за 2014 г.

$$Z_{\text{топл}}^{\text{доп}} = 0,07 \cdot 643043400 \cdot \frac{4906455000000}{2286400000000} = 1034944729 \text{ бел. руб.}$$

В пересчете на доллары США (по среднему официальному курсу белорусского рубля по отношению к доллару США за 2014 г., равному 10215,53 руб.) данный показатель составляет 101311 дол.

Следует отметить, что при снижении степени электрической нагрузки происходит значительный рост удельного расхода топлива – на 55–60 % (с 27 до 42 кг/Гкал при температуре 80 °С и с 30 до 48 кг/Гкал при 120 °С). Работа с низким уровнем нагрузок есть одна из главных причин роста энергоемкости электроэнергетики, так как эффективность функционирования ТЭЦ зависит от объема выработки электрической энергии в теплофикационном режиме.

Для ограничения негативного влияния блок-станций на энергосистему в Республике Беларусь принят ряд мер. В частности, постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17 октября 2011 г. № 1394 утверждены Правила электроснабжения, в которых установлен порядок взаимоотношений РУП-облэнерго с владельцами блок-станций [7]. Диспетчерская служба РУП-облэнерго в соответствии с месячной договорной величиной активной мощности и вырабатываемой электрической энергии задает блок-станции на каждые сутки график нагрузки и отдачи электрической энергии в электрическую сеть РУП-облэнерго. При составлении графиков работы

блок-станций учитываются технические условия и режимы работы энергосистемы, а также энергоузлов, к которым подключены блок-станции, и технические параметры оборудования блок-станций. Владелец блок-станции, которому для обеспечения надежности работы оборудования необходимо иметь резерв электрической мощности энергосистемы, указывает в договоре электроснабжения величину этого резерва в соответствии с техническими нормативными правовыми актами.

При недостаточной мощности блок-станции в договор электроснабжения с ее владельцем включается величина отпуска электрической энергии от электрических сетей РУП-облэнерго с разбивкой по суткам и соответствующая ей величина предельно допустимой суточной потребляемой активной мощности в часы утреннего и вечернего суточных максимумов энергосистемы. В случае наличия у владельца блок-станции избыточной активной мощности и вырабатываемой электрической энергии на тепловом потреблении при условии, что в ходе согласования с энергоснабжающей организацией графика отдачи электрической энергии от блок-станции в электрическую сеть РУП-облэнерго указанным владельцем будут представлены необходимые документы, подтверждающие объемы планируемой выработки в режиме теплоснабжения избыточной электрической энергии, которые он может выдавать в электрическую сеть РУП-облэнерго. РУП-облэнерго обязано принять их на условиях и в объемах, определенных договором электроснабжения.

Постановлением Министерства экономики Республики Беларусь от 15 мая 2015 г. № 32 установлены тарифы на электрическую энергию, производимую из невозобновляемых источников энергии и мазута индивидуальными предпринимателями и юридическими лицами, не входящими в состав ГПО «Белэнерго», и отпускаемую его энергоснабжающим организациям [8]. Согласно данному постановлению, тариф на электрическую энергию, производимую из невозобновляемых источников энергии, мазута на территории Республики Беларусь индивидуальными предпринимателями и юридическими лицами, не входящими в состав ГПО «Белэнерго», и отпускаемую энергоснабжающим организациям данного объединения за 1 кВт·ч без налога на добавленную стоимость принят в размере 859 бел. руб. при официальном курсе рубля, установленном Национальным банком Республики Беларусь, 14160 руб. за 1 дол. США. В случае отклонения официального курса от этого соотношения тариф корректируется. При продаже электрической энергии, производимой из попутного газа и продуктов его переработки, тариф на электрическую энергию применяется с повышающим коэффициентом 1,5. К тарифам на электрическую энергию применяются следующие коэффициенты:

- при выполнении согласованных графиков отдачи электрической энергии: производимой из природного газа и мазута в часы минимальных нагрузок энергосистемы (с 23:00 до 6:00) – 0,85, в часы максимальных нагрузок энергосистемы (с 8:00 до 11:00 и с 18:00 до 21:00) – 1,15, в остальное время суток – 1,0;

производимой из невозобновляемых источников энергии, за исключением природного газа, в часы максимальных нагрузок энергосистемы (с 8:00 до 11:00 и с 18:00 до 21:00) – 1,15, в остальное время суток – 1,0;

- электрической энергии, производимой из природного газа и мазута, с отклонением более 5 % от объемов, предусмотренных согласованными графиками отдачи электрической энергии:

в сторону увеличения в части объемов, отпускаемых сверх 5 % от объемов, предусмотренных согласованными графиками отдачи: в часы минимальных нагрузок энергосистемы (с 23:00 до 6:00) – 0,2, в остальное время суток – 0,7;

в сторону уменьшения: в часы максимальных нагрузок энергосистемы (с 8:00 до 11:00 и с 18:00 до 21:00) – 1,0, в остальное время суток – 0,85 [4].

Тарифы на транспортировку электрической энергии, произведенной на не входящих в состав ГПО «Белэнерго» генерирующих мощностях, установлены постановлением Министерства экономики № 30 и составляют 305 бел. руб. за 1 кВт·ч [9, 10]. Эти тарифы распространяются на передачу электроэнергии всеми производителями – владельцами блок-станций, не входящими в состав ГПО «Белэнерго», как своим структурным подразделениям, так и любым другим юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям, в пределах одной области или Минска.

В рамках политики регламентирования автор статьи предлагает ввести следующие меры по ограничению влияния блок-станций на энергосистему:

1) плату за горячий резерв, необходимый энергосистеме в случае отказа работы блок-станции:

$$T_{гр} = P_{б-с} Z_{уд-пост}, \quad (5)$$

где  $T_{гр}$  – плата блок-станциями за горячий резерв, руб.;  $P_{б-с}$  – мощность блок-станции, МВт;  $Z_{уд-пост}$  – средние удельно-постоянные затраты ТЭЦ, входящих в энергосистему, которые рассчитываются по формуле

$$Z_{уд-пост} = \frac{\sum_i Z_{пост}^{ТЭЦ_i}}{\sum_i P^{ТЭЦ_i}}; \quad (6)$$

$Z_{пост}^{ТЭЦ_i}$  – постоянные затраты  $i$ -й ТЭЦ, руб.;  $P^{ТЭЦ_i}$  – установленная мощность  $i$ -й ТЭЦ, МВт;

2) плату за диспетчеризацию

$$T_{дисп} = \frac{Z_{дисп}^T}{\Theta^T} \left( 1 + \frac{p'}{100} \right) \Theta_{26-с}^T, \quad (7)$$

где  $T_{дисп}$  – плата блок-станциями за диспетчеризацию, руб.;  $Z_{дисп}^T$  – затраты на диспетчеризацию по энергосистеме за период, руб.;  $\Theta^T$  – выработка

электрической энергии по энергосистеме за период, кВт·ч;  $\Xi_{26-с}^T$  – то же на блок-станциях за период, кВт·ч;  $p'$  – норма прибыли за оказание услуг по диспетчеризации, %.

3) плату за передачу и распределение

$$T_{\text{расп}} = \frac{Z_{\text{расп}}^T}{\Xi^T} \left( 1 + \frac{p'}{100} \right) \Xi_{26-с}^T, \quad (8)$$

где  $T_{\text{расп}}$  – плата блок-станциями за передачу и распределение, руб.;  $Z_{\text{расп}}^T$  – затраты на передачу и распределение по энергосистеме за период, руб.

Расчеты показали, что в 2014 г. ГПО «Белэнерго» могло бы получить дополнительную выручку в размере 885153,2 млн руб., или 63,225 млн дол. США, в том числе 91539,4 млн руб. в качестве платы за горячий резерв; 4475,2 млн руб. – за диспетчеризацию; 789138,6 млн руб. – за передачу и распределение электроэнергии, вырабатываемой на блок-станциях на традиционных видах топлива.

Величину платы за горячий резерв, необходимый энергосистеме в случае отказа работы блок-станции, платы за диспетчеризацию, передачу и распределение целесообразно устанавливать для каждой блок-станции в договоре электроснабжения после согласования методики расчета Министерством экономики Республики Беларусь.

## ВЫВОДЫ

Преимуществами от принятия предлагаемых мер являются:

1) качественный рост энергоэффективности электроэнергетики. Предложенные меры ограничат отпуск электрической энергии от блок-станций в сеть, что в свою очередь будет способствовать снижению разгрузки ТЭЦ в часы ночного минимума и соответственно уменьшению удельного расхода топлива на ТЭЦ, повышая таким образом энергоэффективность всей системы;

2) снижение себестоимости электрической энергии в целом по энергосистеме, которое будет обеспечено за счет: уменьшения переменных затрат вследствие более эффективной работы ТЭЦ; дополнительных доходов, поступающих от платы блок-станций за горячий резерв, диспетчеризацию, передачу и распределение; отсутствия дополнительных затрат энергосистемы на покупку электрической энергии от блок-станций;

3) стимулирование рыночных элементов в электроэнергетике. Предложенные меры позволят создать более здоровую конкурентную среду между объектами большой (ТЭЦ) и малой энергетики (блок-станции) вследствие

того, что ТЭЦ перестанут нести часть затрат (на диспетчеризацию, передачу и распределение) за своих конкурентов;

4) возможность достаточно быстро реагировать на изменение экономических условий. В отличие от существующего порядка установления тарифов для блок-станций, согласно которому тарифы пересматриваются нерегулярно (один или два раза в год), предложенная автором методика расчета платы за горячий резерв, диспетчеризацию, передачу и распределение позволит рассчитывать размер тарифов в режиме, близком к режиму реального времени (к примеру, по истечении месяца).

Кроме того, регламентирование деятельности блок-станций будет содействовать более широкому использованию возобновляемых источников энергии и развитию атомной энергетики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Забелло, Е. П. Режимы работы блок-станций при параллельной работе с электрическими сетями энергосистемы / Е. П. Забелло, В. А. Тополев // Энергетическая стратегия. 2012. № 1 (25). С. 28–31.
2. Филатова, Л. И. Вопросы формирования тарифов на электрическую энергию, приобретаемую РУП-облэнерго у блок-станций, и доступа к электрическим сетям энергосистемы / Л. И. Филатова // Энергия и Менеджмент. 2012. Т. 66, № 3. С. 7–10.
3. Дегиль, Б. Г. Технические требования энергоснабжающей организации при подключении блок-станции к электрической сети / Б. Г. Дегиль // Энергетическая стратегия. 2011. № 4. С. 27–28.
4. Солодухо, И. В. О разработке требований к блок-станциям субъектов хозяйствования [Электронный ресурс] / И. В. Солодухо // Актуальные проблемы энергетики: материалы 65-й науч.-техн. конф. студ. и аспирантов. Минск: БНТУ, 2013. Режим доступа: <http://electro.bntu.by/user/sekcija7.pdf>. Дата доступа: 13.11.2015.
5. Молочко, Ф. Цена резерва / Ф. Молочко, А. Молочко // Энергетика и ТЭК. 2008. № 3. С. 22–23.
6. ГПО «Белэнерго» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.energo.by/>. Дата доступа: 30.10.2015.
7. Об утверждении Правил электроснабжения: постановл. Совета Министров Респ. Беларусь, 17 окт. 2011 г., № 1394 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь, 2011, 5/34630.
8. О тарифах на электрическую энергию, производимую из невозобновляемых источников энергии, мазута на территории Республики Беларусь индивидуальными предпринимателями и юридическими лицами, не входящими в состав государственного производственного объединения электроэнергетики «Белэнерго», и отпускаемую энергоснабжающим организациям данного объединения: постановл. Министерства экономики Респ. Беларусь, 15 мая 2015 г., № 32 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь, 2015, 8/29964.
9. О внесении изменения в постановление Министерства экономики Республики Беларусь от 29 марта 2012 г. № 23: постановление Министерства экономики Респ. Беларусь, 9 апреля 2014 г., № 30 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2014. 8/28580.
10. Интеграция Белорусской АЭС в энергосистему: влияние на национальную безопасность и экономическое развитие / Т. Г. Зорина [и др.] // Экономика и управление. 2015. № 4. С. 17–24.

## REFERENCES

1. Zabello Ye. P., Topolev V. A. (2012) Modes of Customer's Plant Operation in Parallel Functioning with the Electric Grids of the Power System. *Energeticheskaya Strategiya* [Power Strategy], 25 (1), 28–31 (in Russian).
2. Filatova L. I. (2012) Problems of Formation of Tariffs for Electric Power Purchased by the Oblenergo RUE at the Customer's Plants and of the Access to Electric Grids of the Power System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], 66 (3), 7–10 (in Russian).
3. Degil B. G. (2011) The Technical Requirements of the Power Supplying Organization in Connection the Customer's Plant to the Electricity Grid. *Energeticheskaya Strategiya* [Power Strategy], (4), 27–28 (in Russian).
4. Solodukho I. V. (2013) Requirements to the Customer's Plant of Economic Entities. *Aktualnye Problemy Energetiki: Materialy 65-i Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii Studentov i Aspirantov* [Topical Problems of Power Engineering: Proceedings of the 65<sup>th</sup> Scientific and Technical Conference of Undergraduate and Graduate Students]. Available at: <http://electro.bntu.by/user/sekcija7.pdf>. (Accessed 13 November 2015) (in Russian).
5. Molochko F., Molochko A. (2008) The Price of the Stockpile. *Energetika i TEK* [Power Engineering and the Fuel-and-Energy Complex], (3), 22–23 (in Russian).
6. State Production Association of Power Engineering "Belenergo" Available at: <http://www.energo.by>. (Accessed 30 October 2015) (in Russian).
7. On Approval of the Rules of Electricity: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 17.10.2011, No 1394. *Natsionalnyi Reestr Pravovykh Aktov Respubliki Belarus* [The National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus], 2011, 5/34630 (in Russian).
8. On Tariffs for Electric Energy Produced of Non-Renewable Energy Sources, Boiler Oil on the Territory of the Republic of Belarus by Individual Entrepreneurs and Legal Persons not Belonging to the State Production Association of Power Engineering "Belenergo", and Delivered to the Power Supplying Organizations of the Association: Resolution of the Ministry of Economy of the Republic of Belarus of 15 May 2015, No 32. *Natsionalnyi Reestr Pravovykh Aktov Respubliki Belarus* [The National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus], 2015, 8/29964 (in Russian).
9. On Introducing Alterations in the Decree of the Ministry of Economy of the Republic of Belarus of March 29, 2012, No 23: Resolution of the Ministry of Economy of the Republic of Belarus, April 9, 2014, No 30. *Natsionalnyi Reestr Pravovykh Aktov Respubliki Belarus* [The National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus], 2014, 8/28580 (in Russian).
10. Zorina T. G., Rak V. A., Tkachev V. A., Shershunovich E. S. (2015) Integration of the Belarusian NPP to the Energy System: the Impact on National Security and Economic. *Ekonomika i Upravlenie* [Economy and Management], (4), 17–24 (in Russian).

Received: 9 February 2016

Accepted: 2 May 2016

Published online: 30 May 2017