

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 59, № 3

2016

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
РИНЦ; Directory of Open Access Journals (DOAJ)

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Фурсанов М. И., Криксин П. В.** Влияние молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций 191
- Румянцев Ю. В.** Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора 203
- Ролик Ю. А., Горностай А. В.** Обеспечение качества электрической энергии в системе электроснабжения при параллельной работе с ветроустановкой 225

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Широглазова Н. В., Зенович-Лешкевич-Ольпинская А. Ю.** Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций (Часть 1) 235
- Гламаздин П. М., Гламаздин Д. П., Ярмольчик Ю. П.** Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности 249
- Сычевский В. А., Чорный А. Д., Баранова Т. А.** Оптимизация аэродинамического режима работы сушильной камеры 260
- Осипов С. Н.** О реальной оценке энергоэффективности жизнеобеспечения жилых зданий при централизованной системе теплоснабжения. 272

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

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

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

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

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

Подписано к печати 26.05.2016. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз.
Дата выхода в свет 2016. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2016

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 59, No 3
2016

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
RSCI; Directory of Open Access Journals (DOAJ)

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Fursanov M. I., Kriksin P. V.** The Effect of Lightning on High Voltage Electrical Substations' Low Voltage Systems 191
- Rumiantsev Yu. V.** A Comprehensive Model for the Power Transformer Digital Differential Protection Functioning Research 203
- Rolik Yu. A., Gornostay A. V.** Providing Quality of Electric Power in Electric Power System in Parallel Operation with Wind Turbine 225

HEAT POWER ENGINEERING

- Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A., Shiroglazova N. V., Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya A. Yu.** Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Steam Power Plants Technical and Economic Indicators Perfection (Part 1) 235
- Glamazdin P. M., Glamazdin D. P., Yarmolchick Yu. P.** Environmental Aspects of Modernization of High Power Water-Heating Boilers 249
- Sychevsky V. A., Chorny A. D., Baranova T. A.** Optimization of Aerodynamic Conditions of the Chamber Drier Operation 260
- Osipov S. N.** On Reasonable Estimate of Energy Performance of the Residential Buildings Sustenance with Centralized Heat-Supply System 272

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

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

Executive Secretary of Editorial Staff V. N. Guryanchyk

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

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

Passed for printing 26.05.2016. Dimension of paper 60×84¹/₈. Offset paper.
Printed on risograp. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 250 copies. Date of publishing 2016. Order list .

ADDRESS

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

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

© Belarusian National Technical University, 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-191-202

УДК 621.311.4-742

Влияние молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций

М. И. Фурсанов¹⁾, П. В. Криксин²⁾

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

²⁾ООО «АЭСАТ Электрик» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Представлены результаты исследований влияний молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций с открытыми распределительными устройствами 110 кВ. Актуальность исследований обусловлена широким распространением таких подстанций, высокими требованиями к надежности их работы, а также повсеместным распространением и высокой вероятностью ударов молнии в подстанции или вблизи них. Наиболее вероятные и опасные влияния молнии на низковольтные системы подстанции определены на основании критического обзора и анализа литературных источников, систематизации практической информации, собранной при обследовании эксплуатируемых подстанций. Для установленного перечня опасных влияний на основе физических процессов молнии разработаны адекватные физико-математические модели. Модель каждого влияния исследована на основании теории чувствительности. Достоверность и адекватность моделей подтверждены путем сопоставления результатов расчетов по исследуемым моделям с результатами расчетов по специализированным программам, а также с практическими или теоретическими данными, полученными другими авторами. Изучены факторы, входящие в состав моделей, определены их природа (естественный или искусственный) и диапазон возможных значений в условиях подстанции, рассчитаны коэффициенты эластичности. Полученные результаты позволяют установить вклад фактора во влияние молнии и возможность управления фактором. Взаимосвязь между факторами и влияниями молнии показана в виде графов. Для практического применения информация, полученная в результате исследований, систематизирована в виде контрольных перечней, которые можно применять при сборе исходной информации с целью разработки молниезащиты подстанции, обследования ее существующей молниезащиты, расследования аварийных ситуаций, связанных с ударами молнии. Результаты исследований использовались на практике при предпроектных обследованиях подстанций, разработке задания на проектирование, проектировании молниезащиты подстанции, в процессе приемосдаточных испытаний и периодической инспекции молниезащиты.

Ключевые слова: низковольтные системы, высоковольтные электрические подстанции, молния, распределительное устройство

Для цитирования: Фурсанов, М. И. Влияние молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций / М. И. Фурсанов, П. В. Криксин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 191–202

Адрес для переписки

Фурсанов Михаил Иванович
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

Fursanov Mikhail I.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
elsyst@bntu.by

The Effect of Lightning on High Voltage Electrical Substations' Low Voltage Systems

M. I. Fursanov¹⁾, P. V. Kriksin²⁾

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

²⁾The "AESAT Electric" Limited Liability Company (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of studies of the effects of lightning on low voltage systems of high voltage electrical substations with outdoor switchgears of 110 kV. The topicality of research is associated with a wide spreading of such substations as well as with a high reliability requirements of their work and, also, with their widespread distribution and high probability of lightning strikes to the substation or around it. The highest probable and the most dangerous effects of lightning on low voltage systems of a substation are determined on the basis of critical review and special literature analysis and, also, of systematization of practical information that had been collected during the survey of operating substations. Adequate physical models were developed for the list of hazardous effects based on physical processes of lightning. A model of each effect was studied on the basis of the sensitivity theory. The accuracy and adequacy of the models were verified by means of comparison of calculation results for the models under investigation with the results of calculations fulfilled in accordance with specialized programs, as well as from practical or theoretical data obtained by other authors. The factors that had been included in the models were studied and were defined in accordance with their nature (natural or artificial), the range of possible values in a substation was determined; the coefficients of elasticity were calculated. The obtained results enable to ascertain the contribution of the factor in the effect of lightning and the ability to control the factor. The relationship between the factors and the effects of lightning are shown as graphs. For practical application the information, obtained as the result of the research, was organized in the form of checklists that can be applied when collecting baseline information to develop the lightning protection of the substation, to examine the existing lightning protection, to investigate emergency situations associated with lightning strikes. The results of the study were used in practice during the pre-design survey of substations, development of the design assignment, design of lightning protection of a substation, and during fulfillment of acceptance tests and periodic inspections of lightning protection.

Keywords: low voltage systems, high voltage electric substations, lightning, switchgear

For citation: Fursanov M. I., Kriksin P. V. (2016) The Effect of Lightning on High Voltage Electrical Substations' Low Voltage Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 191–202 (in Russian)

Молния – мощное природное явление, представляющее опасность практически для всех расположенных на Земле объектов. В статье представлены результаты анализа влияний молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций (далее – ПС) с открытыми распределительными устройствами 110 кВ (далее – ОРУ 110 кВ). Подстанции данного типа распространены в Республике Беларусь, являются важнейшими составляющими системы передачи и распределения электрической энергии. Подстанции с ОРУ 110 кВ занимают большую площадь (как правило, 10000 м² и более), высота расположенных на них сооружений составляет 11 м и более, что определяет высокую вероятность их поражения прямыми ударами молнии. Также высока вероятность заноса тока молнии на подстанцию по грозозащитным тросам воздушных линий электропередачи. Кроме того, на ПС с ОРУ 110 кВ широко используются различные низковольтные системы (устройства релейной защиты и автоматики, система собственных нужд, система постоянного оперативного тока, связь и т. п.)

с малым уровнем помехоустойчивости. Большинство низковольтных систем выполняют ответственные функции, сбой в работе которых может привести к прерыванию технологического процесса. Для исключения сбоев в работе низковольтных систем должны предусматриваться мероприятия по обеспечению их электромагнитной совместимости с электромагнитной обстановкой, в частности защита систем от электромагнитных влияний молнии. Анализ показал, что структура влияния молнии имеет следующий вид: влияние молнии, объект влияния молнии, механизм связи между ними (рис. 1).



Рис. 1. Структура влияния молнии

Fig. 1. The structure of influence of a lightning

Объекты влияния – это низковольтные системы электрических ПС: устройства релейной защиты и автоматики, устройства системы собственных нужд, устройства системы постоянного оперативного тока, связь, приборы регистрации и измерения. Влияния молнии и механизмы связи являются предметом исследований. В статье приводятся результаты критического обзора литературных источников, физико-математического моделирования влияний молнии, а также их функциональный анализ, результаты натурных измерений, инженерных расчетов и расчетов по специализированным компьютерным программам.

Анализ показал, что влияния молнии на низковольтные системы подстанции с ОРУ 110 кВ с наибольшей вероятностью происходят при ее ударе в молниеотводы подстанции и грозозащитные тросы высоковольтных линий электропередачи. По данным [1, 2] и из практического опыта установлено, что в результате названных событий возникают:

- повышение напряжения на конструкции молниеотвода, что приводит к повреждению:
 - расположенного на молниеотводе электрического оборудования;
 - электрических цепей на молниеотводе и распространению по ним потенциала;
 - электрического оборудования, расположенного рядом;
 - близлежащих контрольных кабелей;
- повышение напряжения на заземлителе молниеотвода и, следовательно:
 - повреждение расположенных вблизи заземлителей контрольных кабелей;
 - повреждение расположенного вблизи оборудования;
 - вынос потенциала по заземляющему устройству или расположенным рядом с молниеотводом проводящим элементам и повреждение удаленных от молниеотвода оборудования и цепей;
- неравномерное распределение потенциала по заземляющему устройству, что приводит к:
 - термическому перегреву проводников, заземленных в разных точках подстанции;

повреждению изоляции протяженных кабелей, экраны которых заземлены в разных точках подстанции;

- излучаемые электромагнитные поля, обусловленные протеканием тока молнии по молниеотводу, что ведет к:

повреждению или ухудшению работы низковольтного оборудования;
появлению помех в контрольных кабелях.

Перечисленные влияния могут быть систематизированы следующим образом:

- перенапряжения на заземлителе молниеотвода при стекании с него тока молнии;
- искровой пробой при стекании тока молнии с заземлителя;
- перенапряжения на конструкции пораженного молнией объекта;
- перенапряжения между двумя объектами, один из которых поражен молнией;
- перенапряжения на металлических оболочках при протекании по ним тока молнии;
- перенапряжения на проводниках, прокладываемых для дополнительной защиты вдоль кабельных трасс;
- напряжения и токи в петлях проводников, которые возникают при дистанционных влияниях молнии.

Для названных влияний молнии исследована физика процесса, разработана и верифицирована адекватная математическая модель, изучены входящие в модель факторы: определены их природа и возможный диапазон значений.

Исследуемая модель представлена в виде функции Y из n переменных $(x_1, ..., x_j, ..., x_n)$ [3]:

$$Y = f(x_1, ..., x_j, ..., x_n), \quad (1)$$

где $x_1, ..., x_j, ..., x_n$ – факторы, определяющие величину влияния молнии.

Для оценки влияния фактора x_j на величину Y вычисляется коэффициент чувствительности s_j [3]

$$s_j = \frac{\partial Y}{\partial x_j}. \quad (2)$$

Максимальное приращение значения ΔY при изменении исследуемого фактора на величину Δx_j определяется следующим образом:

$$\Delta Y = \sum_{j=1}^n s_j \Delta x_j. \quad (3)$$

Оценка вклада x_j в величину влияния Y выполняется на основании коэффициентов эластичности [3]

$$\delta_j = \frac{\partial Y}{\partial x_j} \frac{x_j}{Y} = s_j \frac{x_j}{Y}. \quad (4)$$

Коэффициент эластичности δ_j показывает, на сколько процентов изменится функция Y при изменении факторной переменной на 1 %. В связи с тем что исследуемые функции нелинейные, величина коэффициента эластичности не имеет определенного значения, поэтому его расчет выполняется для всей области возможных значений фактора, что позволяет построить функциональные зависимости изменения коэффициента эластичности от изменения фактора и коэффициента эластичности от изменения влияния Y . Полученные зависимости дают возможность оценить вклад фактора в величину влияния Y в любой области значений фактора или влияния.

Приведем пример влияния, вызванного перенапряжениями на заземлителе молниеотвода, возникающими при ударе молнии в молниеотвод. Перенапряжения появляются вследствие наличия сопротивления, которое встречает ток молнии при стекании с заземлителя в грунт. При этом поведение заземлителя при стекании с него мощного импульсного тока молнии имеет ряд отличительных особенностей, в частности это процессы ионизации, индуктивные и емкостные связи, которые необходимо учитывать при анализе [4–6]. Указанная физика процесса может быть описана следующей функцией импульсного напряжения:

$$U_{\text{имп}} = f(I_{\text{м(3)}}, \alpha_{\text{и}}, R_{\text{н}}), \quad (5)$$

где $I_{\text{м(3)}}$ – ток молнии, стекающий с заземлителя молниеотвода в грунт, А; $\alpha_{\text{и}}$ – импульсный коэффициент, учитывающий особенности поведения заземлителя при протекании по нему тока молнии, о. е.; $R_{\text{н}}$ – сопротивление заземлителя молниеотвода постоянному току, Ом.

Составляющие функции (5) также являются зависимыми переменными и имеют вид:

$$I_{\text{м(3)}} = f(I_{\text{м}}, n_{\text{т}}); \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{и}} = f(S_3, \rho, I_{\text{м}}); \quad (7)$$

$$R_{\text{н}} = f(\rho, L, n, S, d_1, d_2, H, l), \quad (8)$$

где $n_{\text{т}}$ – число токоотводов молниеотвода, шт.; $I_{\text{м}}$ – ток молнии, кА; S_3 – площадь заземлителя молниеотвода, м²; ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; L – суммарная длина горизонтальных заземлителей, м; H – глубина прокладки горизонтальных заземлителей, м; n – число вертикальных заземлителей, шт.; l – длина одного вертикального заземлителя, м; d_1, d_2 – диаметр горизонтального и вертикального заземлителя соответственно, м.

Проверка адекватности анализируемой модели выполнена путем сопоставления ручных расчетов и по специализированной программе «ОРУ-М» (разработана МЭИ (ТУ), РАО «ЕЭС России», рег. ном. в Роспатенте 2002611768). Расчеты проведены для различных значений удельного сопротивления грунта (от 100 до 1000 Ом·м), тока молнии (30, 50, 100 кА),

для заземлителей следующего вида: простой заземлитель молниеотвода с конфигурацией по требованиям [7]: четырехлучевой заземлитель с длиной каждого луча 3 м, на концах лучей – электроды длиной 3 м, глубина прокладки заземлителей 0,7 м, материал – сталь круглая диаметром 12 мм; сложный заземлитель молниеотвода, совмещенный с сетчатым заземляющим устройством подстанции площадью $100 \times 100 \text{ м}^2$ с шагом сетки $20 \times 20 \text{ м}$. Полученные функциональные зависимости импульсного сопротивления от величины удельного сопротивления грунта для токов молнии 30, 50, 100 кА показаны на рис. 2.

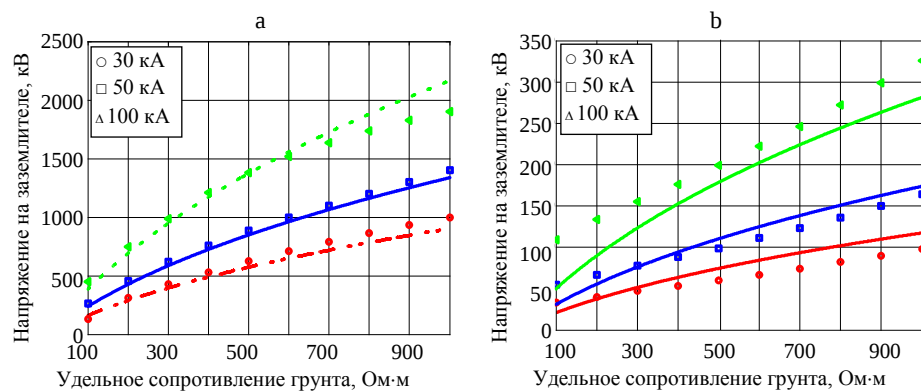


Рис. 2. Зависимость напряжения на заземлителе от удельного сопротивления грунта при разных значениях тока молнии (инженерный и компьютерный расчеты): а – простая модель; б – сложная модель; знаками $\circ$, $\square$, $\triangle$ отмечены результаты расчетов по компьютерной программе при токах 30, 50, 100 кА соответственно; сплошные линии – результаты расчетов по принятой модели

Fig. 2. Dependence of voltage on the earthing upon soil resistivity at different values of the lightning current (manual and computer calculations): а – a prime model; б – a complex model; the results of calculations on the program at currents 30, 50, 100 kA are noted by the signs $\circ$, $\square$, $\triangle$ respectively; solid lines – demonstrate the results of calculations in accordance with the model adopted

Анализ расчетов показал, что импульсное напряжение имеет одинаковый тренд при изменении удельного сопротивления грунта и тока молнии, максимальная разность полученных значений составляет 18 и 14 % для простого и сложного заземлителей соответственно. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что исследуемая модель адекватно и с достаточной точностью отражает рассмотренный процесс.

На следующем этапе проанализированы факторы, составляющие модель, изучена их природа (искусственная или естественная). Искусственными факторами можно управлять (параметры заземлителей, конфигурация и т. п.), естественные факторы можно только учитывать (величина тока молнии, удельное сопротивление грунта и т. п.). Определен диапазон возможных значений факторов в условиях высоковольтной подстанции на основании практического опыта и анализа литературных источников. Рассчитаны коэффициенты эластичности факторов и построены графические зависимости коэффициентов эластичности от изменения факторов и величины рас-

смагриваемого влияния. Пример названных графических зависимостей факторов функции (5) от изменения $U_{\text{имп}}$, $I_{\text{м(3)}}$, $\alpha_{\text{н}}$ показан на рис. 3.

Результаты расчетов сведены в граф на рис. 4, где показан возможный диапазон изменения факторов (минимальное и максимальное значения) и диапазон изменения коэффициентов эластичности для составляющих и самой функции влияния (минимальное, среднее и максимальное значения).

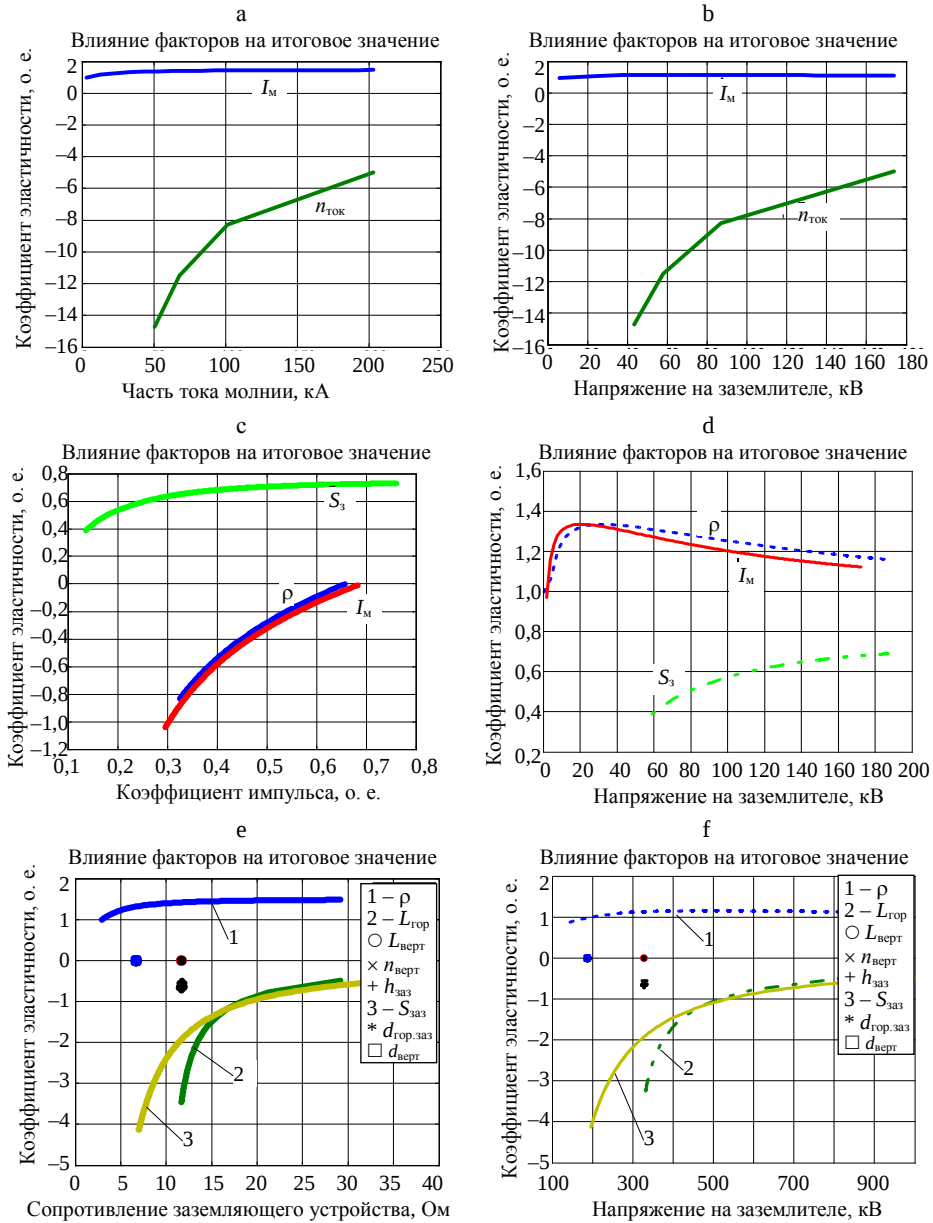


Рис. 3. Коэффициенты эластичности факторов функции (5):

a – $I_{\text{м(3)}}$; b, d, f – $U_{\text{имп}}$; c – $\alpha_{\text{н}}$; e – $R_{\text{ст}}$

Fig. 3. The coefficient of elasticity of function (5) factors are:

a – $I_{\text{м(3)}}$; b, d, f – $U_{\text{имп}}$; c – $\alpha_{\text{н}}$; e – $R_{\text{ст}}$

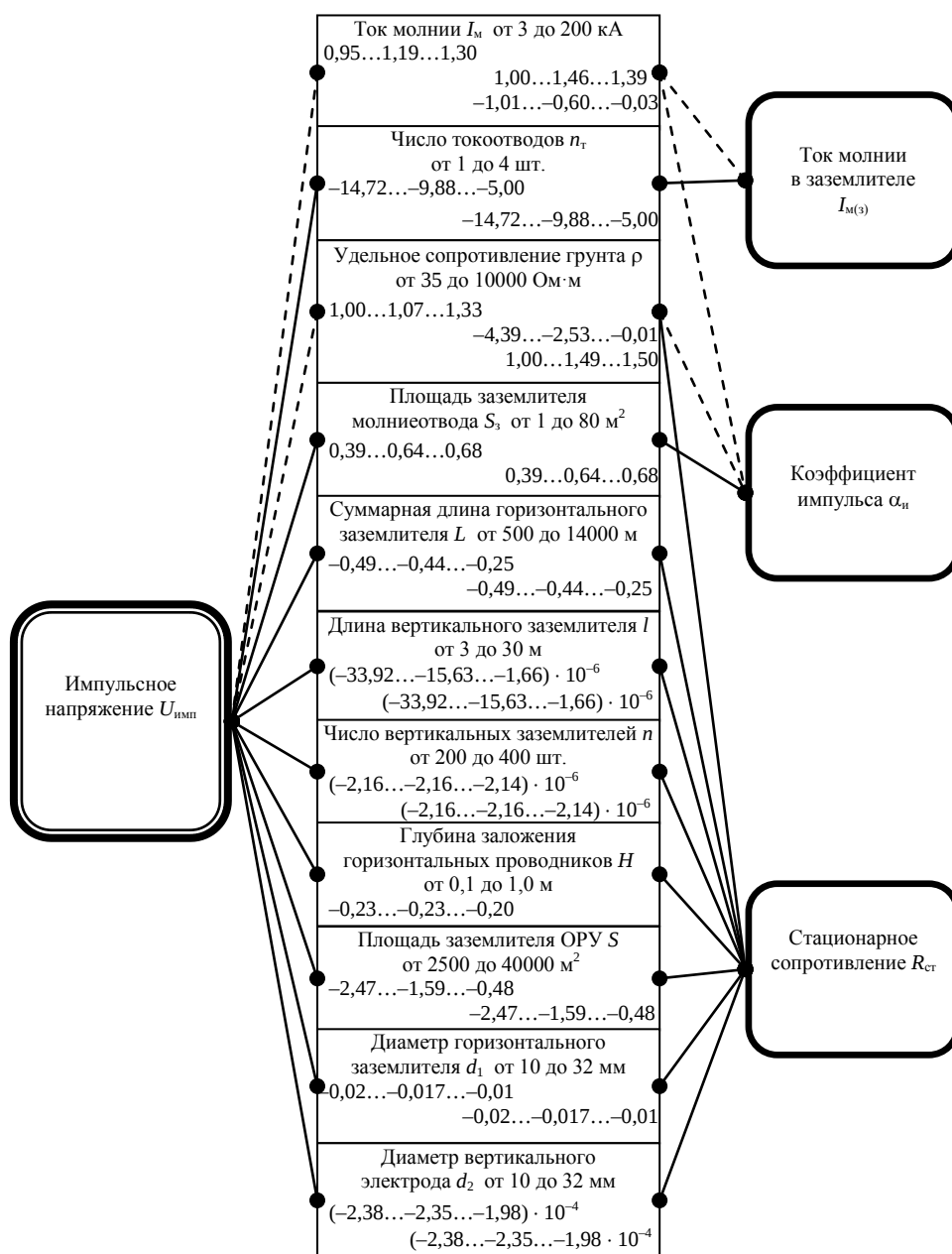


Рис. 4. Связь между факторами и влияниями молнии

Fig. 4. The relationship between the factors and events of a lightning

Пояснения в рамках на рис. 4 указывают название фактора, возможный диапазон его изменения и числовые значения коэффициента эластичности (минимальное значение ... среднее ... максимальное) для каждой рассматриваемой функции; пунктирная линия – естественные факторы, сплошная – искусственные факторы.

Кроме приведенного выше, выполнена систематизация факторов функции (5) по степени их влияния на модель и по их природе [8–11], а именно:

- природные факторы, которые необходимо контролировать: ток молнии, удельное сопротивление грунта;

- искусственные факторы, которыми возможно управлять: число токоотводов, площадь заземляющего устройства подстанции, площадь заземляющего устройства молниеотвода, суммарная длина горизонтальных заземлителей, глубина погружения горизонтальных заземлителей, диаметр горизонтального заземлителя, диаметр вертикального заземлителя, длина вертикального заземлителя, число вертикальных заземлителей.

Аналогичным образом проведены исследования прочих влияний молнии:

- искровой пробой при стекании тока молнии с заземлителя (модель описывается функцией $r_{\text{и}}$ радиуса искровой зоны)

$$r_{\text{и}} = f(I_{\text{м}}, n_{\text{т}}, l, \rho, E_{\text{пр}}), \quad (9)$$

где l – длина заземлителя, м; $E_{\text{пр}}$ – пробивная напряженность грунта, В/м;

- перенапряжения на конструкции пораженного молнией объекта (модель процесса описывается функцией магнитной составляющей индуктированного напряжения $U_{\text{м}}$, электрической составляющей индуктированного напряжения $U_{\text{эл}}$, составляющей падения электрического напряжения $U_{\text{э}}$):

$$U_{\text{м}} = f(a, h, h', r_{\text{э}}, v_{\text{г}}, t); \quad (10)$$

$$U_{\text{эл}} = f(a, h, h', r_{\text{э}}, v_{\text{г}}, t), \quad (11)$$

где a – скорость изменения тока молнии, А/с; h – высота рассматриваемого объекта, м; h' – высота точки, для которой рассчитывается перенапряжение, м; $r_{\text{э}}$ – эквивалентный радиус токопровода, м; $v_{\text{г}}$ – скорость перемещения прямоугольной волны заряда вдоль канала молнии, м/с; t – длительность разряда, с;

- перенапряжения между двумя объектами, один из которых поражен молнией (модель процесса описывается магнитной $U_{\text{м2}}$ и электрической $U_{\text{э2}}$ функциями, электростатической составляющей напряжения $U_{\text{э.ст}}$):

$$U_{\text{м2}} = f(h_{\text{об}}, \partial i, \partial t, d, r_{\text{т}}); \quad (12)$$

$$U_{\text{э2}} = f(R_{\text{вз}}, I_{\text{м(2)}}); \quad (13)$$

$$U_{\text{э.ст}} = f(C, R_{\text{з}}, h, I_{\text{м}}, d), \quad (14)$$

где ∂i – величина импульса тока фронта молнии, А; ∂t – длительность фронта импульса, с; $h_{\text{об}}$ – высота непораженного объекта, м; d – расстоя-

ние между объектами, м; r_t – усредненный радиус непораженного объекта, м; $R_{вз}$ – сопротивление заземления между объектом и молниеотводом, Ом; $I_{м(2)}$ – часть тока молнии, протекающего по заземлителю, кА; C – емкость объекта, пФ; R_3 – сопротивление заземления объекта, Ом; h – высота рассматриваемого объекта, м; d – расстояние от точки удара до объекта, м;

- перенапряжения на металлических оболочках $U_{обол}$ при протекании по ним тока молнии

$$U_{обол} = f(R_0, I_m, \rho, \tau_b), \quad (15)$$

где R_0 – удельное сопротивление экрана, Ом/м; τ_b – время спада импульса тока молнии до половины амплитуды, мкс;

- перенапряжения на проводниках $U_{пзп}$, прокладываемых для дополнительной защиты вдоль кабельных трасс

$$U_{пзп} = f(R_0, I_m, \rho); \quad (16)$$

- напряжения $U_{оп}$ и токи $I_{зп}$ в петлях проводников, которые возникают при дистанционных влияниях молнии:

$$U_{оп} = f(I_m, T_1, h_b, e, f, d_b, \eta, K_s, K_c, r); \quad (17)$$

$$I_{зп} = f(I_m, T_1, h_b, e, f, d_b, \eta, K_s, K_c, r), \quad (18)$$

где h_b – ширина или высота витка, м; e – длина витка, м; f – расстояние от канала разряда до стены сооружения, м; d_b – расстояние от витка до стены сооружения, м; η – коэффициент экранирования для экрана сооружения (экран LPZ 1); K_s – коэффициент экранирования, учитывающий экранирующий эффект экрана кабеля, о. е.; K_c – коэффициент, который учитывает распределение тока между идущими вниз проводниками; r – радиус проводника в витке, м.

ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты исследований влияний молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций с открытыми распределительными устройствами 110 кВ.

2. Разработаны, верифицированы и проанализированы физико-математические модели следующих влияний молнии: перенапряжения на заземлителе молниеотвода при стекании с него тока молнии; искровой пробой при стекании тока молнии с заземлителя; перенапряжения на конструкции

пораженного молнией объекта; перенапряжения между двумя объектами, один из которых поражен молнией; перенапряжения на металлических оболочках при протекании по ним тока молнии; перенапряжения на проводниках, прокладываемых для дополнительной защиты вдоль кабельных трасс; напряжения и токи в петлях проводников, которые возникают при дистанционных влияниях молнии.

3. Изучены факторы моделей (определена природа: естественный или искусственный; диапазон возможных изменений), рассчитаны коэффициенты эластичности для каждого входящего в модель фактора; выполнена систематизация результатов исследований в виде графов, отражающих взаимосвязь между факторами и влияниями молнии.

4. Полученная информация систематизирована в виде контрольных перечней, которые применяются при сборе исходной информации для разработки молниезащиты подстанции, обследования существующей молниезащиты подстанции, расследования аварийных ситуаций, связанных с ударами молнии.

5. Результаты исследований рекомендуются к применению в следующей практической деятельности: при предпроектных обследованиях подстанций для сбора информации о текущем состоянии молниезащиты, разработке задания на проектирование, проектировании молниезащиты подстанции, приемосдаточных испытаниях молниезащиты и ее периодической инспекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Криксин, П. В. Исследования характеристик заземлителей молниеотводов / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // 65-я науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов Белорус. нац. техн. ун-та. Минск, 2012.
2. Криксин, П. В. Вторичные влияния молнии. Как она поражает электронику предприятий / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // Энергия и Менеджмент. 2014. № 1. 34–40.
3. Пиковский, А. А. Техничко-экономические расчеты в энергетике в условиях неопределенности / А. А. Пиковский, В. А. Таратин. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 196 с.
4. Криксин, П. В. Оценка электромагнитных влияний на подстанции / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // 65-я науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов Белорус. нац. техн. ун-та. Минск, 2012.
5. Криксин, П. В. Моделирование и анализ процессов, происходящих при стекании тока молнии в грунт / П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. 2012. № 2. С. 14–19.
6. Криксин, П. В. Заземляющее устройство подстанции – основа обеспечения электромагнитной совместимости технических средств: опыт Белорусской энергосистемы / П. В. Криксин, Н. В. Бохан // Энергия и Менеджмент. 2011. № 6. С. 18–20.
7. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339–2011. Введ. 01.12.2011. Минск: Минэнерго, 2011. 593 с.
8. Базелян, Э. М. Физика молнии и молниезащиты / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзен. М.: Физматлит, 2001. 320 с.

9. Базелян, Э. М. Физические и инженерные основы молниезащиты / Э. М. Базелян, Б. Н. Горин, В. И. Левитов. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 223 с.
10. IEC 62305-1:2010. Protection Against Lightning. Part 1: General Principles. 137 p.
11. VDB Blitzschutz Montage-Handbuch Online. Verband Deutscher Blitzschutzfirmen [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.vdb.blitzschutz.com. Дата доступа: 02.03.2015.

Поступила 06.01.2016 Подписана в печать 07.03.2016 Опубликовано онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Kriksin P. V., Fursanov M. I. (2012) Testing of Earthing Lightning. *65-ia Nauch.-Tekhn. Konf. Prof.-Prepod. Sostava, Nauch. Rabotnikov, Doktorantov i Aspirantov Belorus. Nats. Tekhn. Un-ta* [The 65th Scientific and Technical Conference of Lectures, Reserchers and Graduate Students of Belarusian National Technical University]. Minsk, BNTU (in Russian).
2. Kriksin P. V. (2014) Secondary Effects of Lightning. How it Affects Electronics of Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (1), 34–40 (in Russian).
3. Pikovskiy A. A., Taratin V. A. (1981) *Technical-and-Economical Calculations in the Energy Sector under Uncertainty*. Leningrad, Publisher of the Leningrad State University. 196 (in Russian).
4. Kriksin P. V., Fursanov V. I. (2012) Evaluation of Electromagnetic Effects on the Substation. *65-ia Nauch.-Tekhn. Konf. Prof.-Prepod. Sostava, Nauch. Rabotnikov, Doktorantov i Aspirantov Belorus. Nats. Tekhn. Un-ta* [The 65th Scientific and Technical Conference of Lectures, Reserchers and Graduate Students of Belarusian National Technical University]. Minsk, BNTU (in Russian).
5. Kriksin P. V. (2012) Modeling and Analysis of the Processes Occurring During the Drainage of the Lightning Current into the Ground. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (2), 14–19 (in Russian).
6. Kriksin P. V., Bohan N. V. (2011) Earthing Device of a Substation as the Basis of Electromagnetic Compatibility of Technical Means. The Experience of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (6), 18–20 (in Russian).
7. ТЕР 339–2011 (2011). Installations for Voltages up to 750 kV. The air Lines and Electrical Conductors, Switchboards and Transformer Substations, Installations of Electrical Power and a Battery, the Electrical Installation in Residential and Public Buildings. Rules for Electrical Safety and Protective Measures. Accounting for Electricity. Rates of Acceptance Tests. Minsk, Minenergo. 593 (in Russian).
8. Bazaielyan E. M., Raizen Yu. P. (2001) *Lightning and Lightning Protection Physics*. Moscow: Fizmatlit. 320 (in Russian).
9. Bazaielyan E. M., Gorin B. N., Levitov V. I. (1978) *Physical and Engineering Foundations of Lightning Protection*. Leningrad, Gidrometeoizdat. 223 (in Russian).
10. IEC 62305-1:2010. Protection Against Lightning. Part 1: General Principles. 137.
11. VDB Blitzschutz Montage-Handbuch Online. Verband Deutscher Blitzschutzfirmen. Available at: www.vdb.blitzschutz.com. (Accessed: 2 March 2015).

Received: 06.01.2016

Accepted: 07.03.2016

Published online: 03.06.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-203–224

УДК 621.316.925

Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора

Ю. В. Румянцев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В статье представлена комплексная модель для исследования цифровой дифференциальной защиты двухобмоточного силового трансформатора. Модель разработана в среде динамического моделирования MatLab-Simulink с использованием пакета расширения SimPowerSystems и включает в себя следующие элементы: источник питания, трехфазный силовой трансформатор, трехфазные группы трансформаторов тока и модель цифровой дифференциальной защиты трансформатора. Каждый элемент модели описан в степени, достаточной для понимания его реализации в среде динамического моделирования. Особое внимание уделено описанию принципов обработки, цифровой фильтрации и способам формирования рабочего и тормозного токов основного элемента комплексной модели – цифровой дифференциальной защиты трансформатора. Методом вычислительного эксперимента с использованием разработанной модели исследовано функционирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора при внешних и внутренних (по отношению к защищаемому трансформатору) повреждениях: внутреннее короткое замыкание, внешние короткие замыкания без насыщения и с насыщением трансформаторов тока со стороны низшего напряжения. Для каждого рассмотренного случая приведены осциллограммы рабочего и тормозного токов исследуемой цифровой защиты. Особое внимание уделено анализу функционирования цифровой дифференциальной защиты трансформатора при аномальных режимах работы силового трансформатора: перевозбуждении и возникновении броска тока намагничивания. Приведены осциллограммы протекающих в данных режимах токов и их гармонический состав. Проанализированы причины возникновения данных режимов. Рассмотрены алгоритмы блокирования работы цифровой дифференциальной защиты трансформатора в аномальных режимах, основанные на гармоническом анализе протекающих токов. Показаны недостатки данных алгоритмов и отмечена необходимость их технического совершенствования.

Ключевые слова: моделирование, релейная защита, трансформатор тока, цифровая дифференциальная защита трансформатора, цифровая обработка сигналов, Simulink, MatLab, SimPowerSystems

Для цитирования: 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

Адрес для переписки

Румянцев Юрий В.
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
y.rumiantsev@gmail.com

Address for correspondence

Rumiantsev Yuri V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
y.rumiantsev@gmail.com

A Comprehensive Model for the Power Transformer Digital Differential Protection Functioning Research

Yu. V. Rumiantsev¹⁾

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

Abstract. This article presents a comprehensive model for the two-winding power transformer digital differential protection functioning research. Considered comprehensive model is developed in MatLab-Simulink dynamic simulation environment with the help of SimPowerSystems component library and includes the following elements: power supply, three-phase power transformer, wye-connected current transformers and two-winding power transformer digital differential protection model. Each element of the presented model is described in the degree sufficient for its implementation in the dynamic simulation environment. Particular attention is paid to the digital signal processing principles and to the ways of differential and restraining currents forming of the considered comprehensive model main element – power transformer digital differential protection. With the help of this model the power transformer digital differential protection functioning was researched during internal and external faults: internal short-circuit, external short-circuit with and without current transformers saturation on the power transformer low-voltage side. Each experiment is illustrated with differential and restraining currents waveforms of the digital differential protection under research. Particular attention was paid to the digital protection functioning analysis during power transformer abnormal modes: overexcitation and inrush current condition. Typical current waveforms during these modes were showed and their harmonic content was investigated. The causes of these modes were analyzed in details. Digital differential protection blocking algorithms based on the harmonic content were considered. Drawbacks of these algorithms were observed and the need of their further technical improvement was marked.

Keywords: simulation, relay protection, current transformer, transformer digital differential protection, digital signal processing, Simulink, MatLab, SimPowerSystems

For citation: Rumiantsev Yu. V. (2016) A Comprehensive Model for the Power Transformer Digital Differential Protection Functioning Research. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 203–224 (in Russian)

Введение

Пакет расширения SimPowerSystems-системы динамического моделирования MatLab-Simulink является распространенным инструментом для моделирования электротехнических устройств. Все модели, входящие в данный пакет, проверены в лабораториях канадского производителя электроэнергии – компании Hydro-Québec, где подтверждена адекватность их реализации и математического описания [1]. В библиотеке данного пакета присутствует модель трехфазного двухобмоточного трансформатора, которая является важнейшим элементом как для моделирования энергосистемы, так и для проверки методом вычислительного эксперимента работоспособности современных устройств релейной защиты (РЗ), в частности цифровой дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ) с торможением [2]. Правильное функционирование устройств РЗ во время переходных процессов в основном зависит от формы кривой переменного тока, подводимого к устройству защиты энергообъекта. Вследствие насыщения магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ) в аварийном режиме форма

вторичного тока может существенно отличаться от формы его первичного тока, что значительно влияет на надежность срабатывания цифровой ДЗТ, так как принцип ее функционирования основан на сравнении токов со всех сторон защищаемого объекта.

Отсутствие в SimPowerSystems стандартных моделей измерительного ТТ и цифровых устройств РЗ значительно ограничивает применение данной среды моделирования в исследованиях, связанных с анализом функционирования современных устройств РЗ. Однако данный программный пакет может быть дополнен пользовательскими моделями, созданными с использованием стандартных блоков библиотеки Simulink.

Моделирование трехфазного двухобмоточного силового трансформатора

Стандартная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора Three-phase Transformer (Two Windings) из библиотеки SimPowerSystems построена на основе трех однофазных трансформаторов [1].

Выражения [3] для расчета в относительных единицах (о. е.) параметров модели силового трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ-11, в которых используются только каталожные данные силового трансформатора: $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность силового трансформатора (ВА); P_k – мощность потерь короткого замыкания (Вт); U_k – напряжение короткого замыкания (%); P_0 – мощность потерь холостого хода (Вт); I_0 – ток холостого хода (%), приведены в табл. 1. В модели также необходимо задать значения номинальных напряжений обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений силового трансформатора $U_{1\text{ном}}$ и $U_{2\text{ном}}$ (В) соответственно и номинальную частоту $f_{\text{ном}}$ (Гц).

Таблица 1

Упрощенные формулы для расчета параметров модели трансформатора

Simplified formulas for transformer model parameters calculation

Параметр	Значение, о. е.
Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора	$R_{1(\text{oe})} = R_{2(\text{oe})} = \frac{1}{2} \frac{P_k}{S_{\text{ном}}}$
Индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора	$L_{1(\text{oe})} = L_{2(\text{oe})} = \frac{1}{2} \frac{U_k}{100}$
Активное сопротивление ветви намагничивания	$R_{m(\text{oe})} = \frac{S_{\text{ном}}}{P_0}$
Индуктивность ветви намагничивания	$L_{m(\text{oe})} \approx \frac{100}{I_0}$

Моделирование трехфазной группы ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом»

Основной проблемой при моделировании ТТ является отсутствие в общедоступных источниках геометрических параметров его магнитной системы: сечения магнитопровода и средней длины магнитной силовой

линии. Характеристики намагничивания электротехнических сталей, применяемых для производства магнитопроводов различных типов ТТ, в общем случае подобны. Поэтому для создания упрощенной модели ТТ можно принять, что все магнитопроводы ТТ изготовлены из стали одной марки и имеют одинаковую характеристику намагничивания, приведенную в [4]. Математическая модель трехфазной группы ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок в «звезду с нулевым проводом» содержит уравнения трех однофазных ТТ [5].

После выражения неизвестных геометрических параметров магнитной системы ТТ через его паспортные данные и учитывая принятую характеристику намагничивания, для ТТ со вторичной обмоткой класса точности 10Р и вторичным номинальным током $I_{2\text{ном}} = 5 \text{ А}$ система уравнений, описывающая упрощенную модель трехфазной группы ТТ, в общем случае примет следующий вид [6, 7]:

$$\begin{cases} \frac{dB_{mj}}{dt} = \frac{83,34[(0,0004I_{1\text{ном}} + R_{hj})i_{2j} + R_0i_0]}{K_{\text{ном}}(0,0004I_{1\text{ном}} + R_{\text{ном}j})}, & j = A, B, C; \\ i_{2j} = \frac{5i_{1j}}{I_{1\text{ном}}} - 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot K_{\text{ном}} H_j; \\ B_{mj} = f(H_j); \\ i_0 = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}, \end{cases}$$

где $I_{1\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ; $K_{\text{ном}}$ – номинальная предельная кратность ТТ; $R_{\text{ном}}$ – номинальное активное сопротивление нагрузки ТТ; R_h – реальное активное сопротивление нагрузки ТТ; R_0 – активное сопротивление нулевого провода; i_0 – мгновенное значение тока, протекающего в нулевом проводе ТТ; $B_m = f(H)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали; i_1, i_2 – мгновенные значения первичного и вторичного токов ТТ соответственно.

Моделирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора

Дифференциальная защита является защитой с абсолютной селективностью, действующей без выдержки времени и реагирующей только на повреждения в защищаемой зоне [8]. Принцип действия дифференциальной защиты основан на сравнении токов со всех сторон защищаемого объекта. Цифровая ДЗТ обладает рядом преимуществ по сравнению с выполнением ее на электромеханической элементной базе: программное выравнивание вторичных токов и компенсация фазового сдвига между токами высшей и низшей сторонами трансформатора, правильная работа при определенной степени насыщения измерительных ТТ и т. д. В эпоху электромеханических реле данные процедуры выполнялись при помощи специальных промежуточных ТТ. В цифровых устройствах РЗ такие операции осуществляются программно на основании заданной пользователем информации.

Блок-схема цифровой обработки и фильтрации входных сигналов тока со стороны ВН (HV) и НН (LV) защищаемого силового трехфазного трансформатора приведена на рис. 1. Входные токи i_{a_HV} , i_{b_HV} , i_{c_HV} – вторичные токи трехфазной группы ТТ, расположенной с высшей стороны силового трансформатора; входные токи i_{a_LV} , i_{b_LV} , i_{c_LV} – вторичные токи трехфазной группы ТТ, расположенной с низшей стороны силового трансформатора.

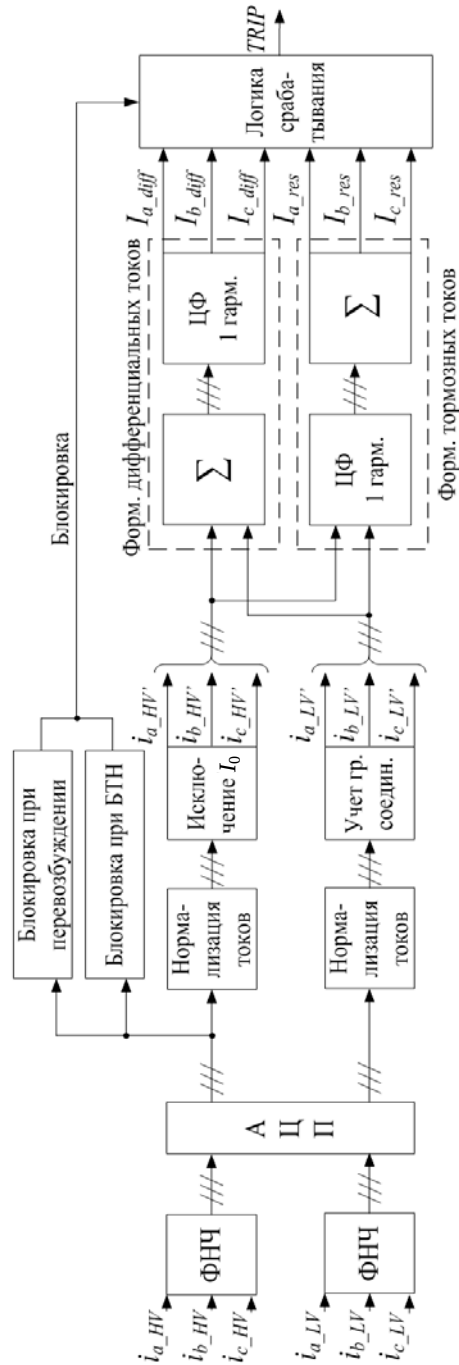


Рис. 1. Блок-схема цифровой обработки и фильтрации входных сигналов

Fig. 1. Digital signal processing and filtering flow chart

Блок «Фильтр нижних частот» (ФНЧ) содержит активный фильтр нижних частот 2-го порядка. Назначение данного аналогового фильтра заключается в подавлении спектральных компонентов, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Блок «Аналого-цифровой преобразователь» (АЦП) осуществляет преобразование выборок отсчетов выходного сигнала блока ФНЧ в цифровой код. Число выборок из аналогового непрерывного входного сигнала на период промышленной частоты (50 Гц) в данной статье принято равным 24, т. е. частота дискретизации сигнала составляет 1200 Гц.

В блоках «Блокировка при броске тока намагничивания» (Блокировка при БТН) и «Блокировка при перевозбуждении» формируется сигнал блокировки срабатывания цифровой ДЗТ при аномальных режимах работы защищаемого силового трансформатора.

Блок «Нормализация токов» осуществляет приведение вторичных токов, поступающих с выхода блока АЦП, к одному базису, т. е. перевод данных значений в о. е. Для этого токи с каждой стороны умножаются на нормирующие коэффициенты, которые для каждой из обмоток силового трансформатора рассчитываются следующим образом:

$$K_{HV} = \frac{\sqrt{3}U_{1\text{ном}}I_{1\text{ном}}}{S_{\text{ном}}I_{2\text{ном}}};$$

$$K_{LV} = \frac{\sqrt{3}U_{2\text{ном}}I_{1\text{ном}}}{S_{\text{ном}}I_{2\text{ном}}},$$

где $I_{1\text{ном}}$, $I_{2\text{ном}}$ – номинальный первичный и вторичный токи ТТ с соответствующей стороны силового трансформатора.

Блок «Исключение I_0 » реализует исключение тока нулевой последовательности из токов высшей стороны силового трансформатора (данная операция применяется только в случае заземления нейтрали силового трансформатора), для чего токи стороны ВН силового трансформатора должны быть умножены на матрицу коэффициентов M_1 [9]

$$M_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}.$$

Блок «Учет группы соединений» (Учет гр. соедин.) осуществляет компенсацию фазового сдвига между токами низшей стороны силового трансформатора и токами стороны высшего напряжения. Например, для моделируемого силового трансформатора со схемой соединения $Y/\Delta-11$ токи со стороны обмотки Δ опережают токи стороны обмотки Y на 30° . Для ком-

пенсации указанного фазового сдвига токи со стороны обмотки, соединенной в Δ , необходимо умножить на матрицу M_2 [9]

$$M_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Блок «Формирователь дифференциальных токов» (Форм. дифференциальных токов) осуществляет формирование дифференциальных (рабочих) токов для каждой фазы в соответствии с выражением $I_{diff} = |i_{HV} + \nabla i_L|$ [9], при этом за положительное направление тока принято направление «к защищаемому объекту». В блоке «Формирователь тормозных токов» (Форм. тормозных токов) выполняется формирование тормозных токов для каждой фазы одним из следующих способов [9]: $I_{res} = \frac{1}{2}(|i_{HV}| + |i_{LV}|)$, $I_{res} = |i_{HV} - i_{LV}|$, $I_{res} = \frac{1}{2}|i_{HV} - i_{LV}|$, $I_{res} = \max(|i_{HV}|, |i_{LV}|)$, причем наиболее традиционным является принятый в данной статье способ $I_{res} = |i_{HV}| + |i_{LV}|$.

Во всех вышеприведенных формулах оператор « $|$ » соответствует операции вычисления действующего значения. Данная операция выполняется в блоке «Цифровой фильтр 1-й гармоники» (ЦФ 1 гарм.), который содержит цифровой фильтр, предназначенный для определения действующего значения основной гармоники сигнала, содержащего высшие гармоники и апериодическую составляющую. В качестве такого фильтра в данной работе применен цифровой фильтр, реализующий однопериодное дискретное преобразование Фурье, в котором по отсчетам косинусной $I^C(n)$ и синусной $I^S(n)$ ортогональных составляющих входного сигнала определяется действующее значение основной гармоники сигнала $I(n)$ [10, 11]:

$$I^C(n) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cos(2\pi n / N);$$

$$I^S(n) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \sin(2\pi n / N);$$

$$|I(n)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(I^C(n))^2 + (I^S(n))^2},$$

где $n = 0 \dots N - 1$ – номер отсчета контролируемого сигнала в окне наблюдения; $i(n)$ – отсчеты входного сигнала; N – число отсчетов на период промышленной частоты.

На выходе блоков для каждой фазы формируются соответственно дифференциальные и тормозные токи I_{a_diff} , I_{b_diff} , I_{c_diff} и I_{a_res} , I_{b_res} , I_{c_res} . Данные токи поступают в блок «Логика срабатывания», где формируется команда на срабатывание или несрабатывание защиты исходя из заданной характеристики цифровой ДЗТ (рис. 2) с учетом наличия или отсутствия сигнала блокировки.

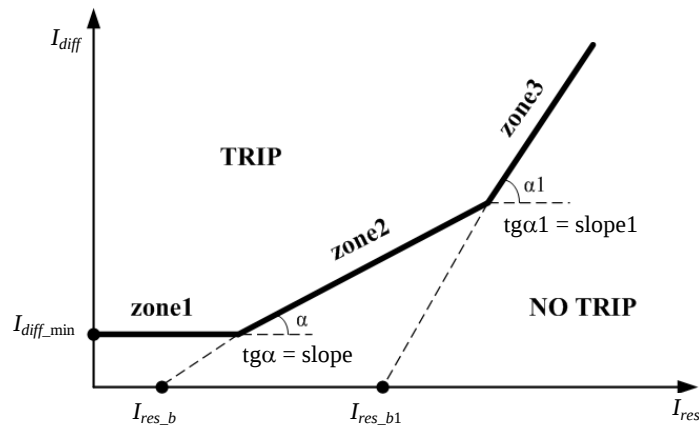


Рис. 2. Характеристика цифровой ДЗТ

Fig. 2. Transformer digital differential protection characteristic

Отличие модели цифровой дифференциальной защиты трансформатора от реального устройства

Цифровая обработка и фильтрация входных сигналов в реальных цифровых устройствах РЗ трансформаторов различных производителей в целом соответствуют блок-схеме на рис. 1. Отличие может заключаться в способе формирования тормозного тока и типах используемых цифровых фильтров [10, 11]. Кроме того, в некоторых цифровых устройствах ДЗТ блокировка срабатывания при аномальных режимах работы защищаемого трансформатора осуществляется на основе анализа дифференциальных токов, а не токов, протекающих со стороны ВН (сторона подачи напряжения), как это принято в данной статье. В представленной модели также не рассматривается функционирование дифференциальной токовой отсечки.

В отличие от реальных устройств цифровой защиты их модели не накладывают никаких физических ограничений, связанных с техническими параметрами используемой аппаратной части. Поэтому реализованная в среде динамического моделирования модель цифровой ДЗТ отличается от реального устройства защиты отсутствием нижеперечисленных аппаратных средств.

В реальных устройствах ДЗТ происходит преобразование входного вторичного тока ТТ в пропорциональное напряжение заданного уровня [11]. Данные входные преобразователи, представляющие собой малога-

баритные промежуточные ТТ, располагаются до блока ФНЧ и обеспечивают гальваническую развязку между внешними и внутренними цепями цифровой защиты. В реальных устройствах ДЗТ также применяется ограничитель входного сигнала АЦП, основное назначение которого заключается в ограничении уровня входного сигнала до значений, соответствующих техническим характеристикам используемого АЦП [11]. Этот ограничитель располагается после блока ФНЧ. Следует отметить, что неучет в модели данных аппаратных средств практически не влияет на точность получаемых результатов моделирования.

Характеристика цифровой дифференциальной защиты трансформатора с торможением

Работу дифференциальной защиты с торможением удобно анализировать с помощью диаграммы, ось абсцисс которой соответствует току торможения I_{res} , а ось ординат – дифференциальному току I_{diff} (рис. 2).

Характеристика ДЗТ с торможением обычно представляет собой три участка (зоны) с разными углами наклона к оси абсцисс. Область диаграммы, расположенная выше ломаной кривой, образованной тремя отрезками, соответствует наличию внутреннего повреждения (TRIP); область, расположенная ниже данной кривой, соответствует отсутствию повреждения в зоне (NO TRIP).

Следовательно, как только траектория рабочей точки, определяемая мгновенными координатами (I_{res} , I_{diff}), которые рассчитываются в блоках формирования рабочих и тормозных токов (рис. 1), перемещается из области NO TRIP в область TRIP, дифференциальная защита фиксирует повреждение в защищаемой зоне. Условие фиксации повреждения для каждой фазы можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I_{diff} > I_{diff_min}; \\ I_{diff} > \text{slope}(I_{res} - I_{res_b}); \\ I_{diff} > \text{slope1}(I_{res} - I_{res_b1}), \end{cases}$$

где I_{diff_min} – минимальный порог срабатывания дифференциальной защиты; slope, slope1 – наклон второго и третьего участков характеристики цифровой ДЗТ соответственно; I_{res_b} , I_{res_b1} – координаты точки пересечения оси абсцисс со вторым и третьим наклонными участками.

Исследование работы цифровой дифференциальной защиты трансформатора

На основании вышеизложенных положений в среде MatLab-Simulink с использованием пакета расширения SimPowerSystems разработана комплексная модель исследования работы цифровой ДЗТ. Структурная схема модели приведена на рис. 3.

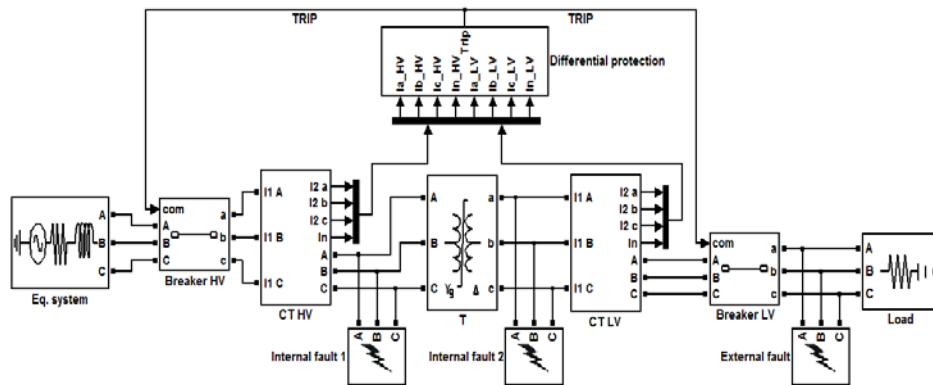


Рис. 3. Структурная схема модели исследования цифровой ДЗТ в MatLab-Simulink

Fig. 3. Digital differential protection research scheme in MatLab-Simulink environment

Схема модели включает в себя: источник питания (Eq. system), трехфазный силовой трансформатор (Т), трехфазные группы трансформаторов тока со стороны ВН (СТ HV) и НН (СТ LV) силового трансформатора, цифровую дифференциальную защиту (Differential protection), трехфазные силовые выключатели со стороны ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) силового трансформатора, нагрузку (Load), блоки создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1 и Internal fault 2) и блок создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (External fault). Следует отметить, что все приведенные далее осциллограммы, диаграммы и формулы относятся к фазе А; время возникновения повреждения $t = 0$ с; рассматриваемое повреждение – трехфазное КЗ с наличием апериодической составляющей. Питание трансформатора осуществляется только со стороны ВН. Для возможности получения осциллограмм дифференциального и тормозного токов, а также траектории перемещения рабочей точки на протяжении всего времени моделирования действие цифровой ДЗТ на отключение силовых выключателей со сторон ВН и НН выведено. Будем считать, что команда на отключение выключателей начинает формироваться логикой защиты в момент перемещения рабочей точки из области NO TRIP в область TRIP с учетом наличия или отсутствия сигнала блокировки.

Внутренне повреждение силового трансформатора при отсутствии насыщения ТТ

Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1).

При внутреннем повреждении вследствие отсутствия подпитки места КЗ со стороны НН ($i_{LV} = 0$) токи протекают только со стороны ВН, поэтому величины I_{diff} и I_{res} имеют одинаковые значения, что и отображается на рис. 4б. Мгновенные координаты рабочей точки равны между собой: $I_{diff} = |i_{HV} + 0| = I_{res} = |i_{HV}| + |0|$, а траекторией ее перемещения является переходящая из области NO TRIP в область TRIP прямая наклонная линия,

изображенная на рис. 4а. Это свидетельствует о том, что цифровая ДЗТ правильно отработала в рассматриваемом режиме, т. е. сформировала команду на отключение силовых выключателей.

На рис. 4б также можно наблюдать характерный колебательный процесс при установлении действующего значения токов I_{diff} и I_{res} , связанный с недостаточным совершенством цифрового фильтра, реализующего одно-периодное дискретное преобразование Фурье при подаче на его вход непериодического сигнала – тока КЗ с наличием затухающей аperiodической составляющей [10, 11].

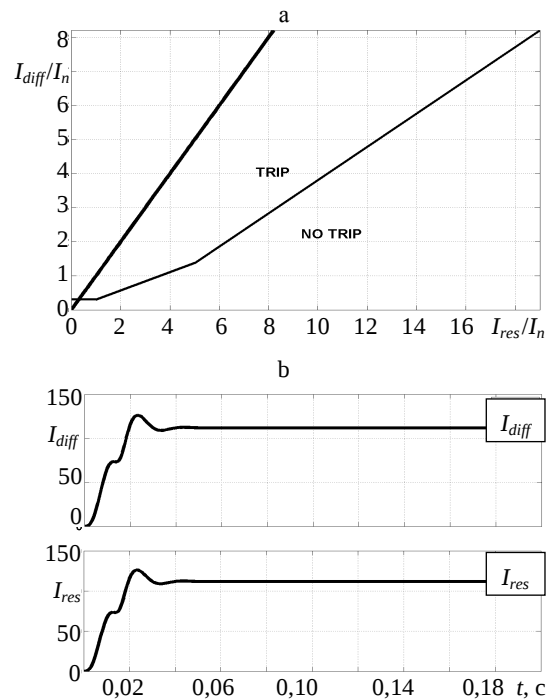


Рис. 4. Траектория перемещения рабочей точки при внутреннем повреждении (а); осциллограмма токов I_{diff} и I_{res} при внутреннем повреждении (б)

Fig. 4. Operating point trajectory during internal fault (a); I_{diff} and I_{res} currents waveform during internal fault (b)

Внешнее повреждение со стороны низшего напряжения силового трансформатора при отсутствии насыщения ТТ

Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (External fault). При данном виде повреждения токи со сторон ВН и НН равны между собой, но имеют разное направление протекания по отношению к защищаемому трансформатору: $i_{HV'}$ протекает «к защищаемому объекту», что принято за положительное направление, а $i_{LV'}$ протекает «от защищаемого объекта», что принято за отрицательное направление. Поэтому дифференциальный ток $I_{diff} = |i_{HV'} - i_{LV'}| = 0$, что и отображается на рис. 5б.

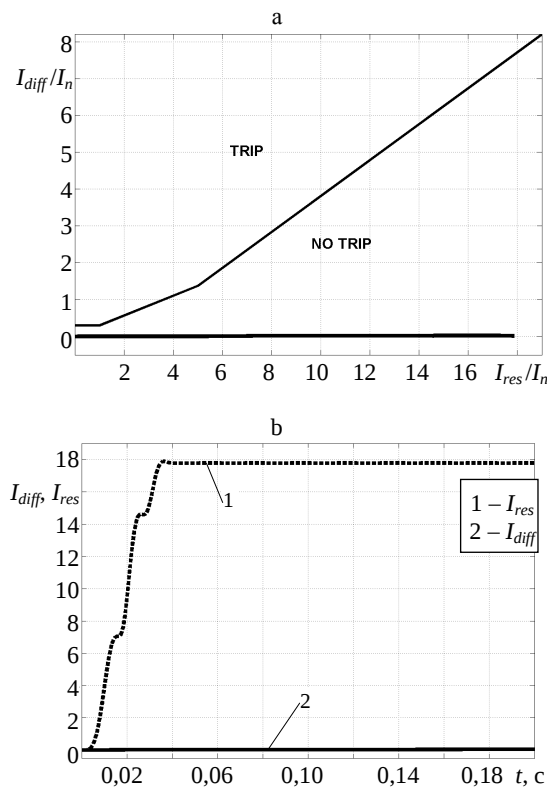


Рис. 5. Траектория перемещения рабочей точки при внешнем повреждении без насыщения ТТ (а); осциллограмма токов I_{diff} и I_{res} при внешнем повреждении без насыщения ТТ (b)

Fig. 5. Operating point trajectory during external fault without CT saturation (a); I_{diff} and I_{res} currents waveform during external fault without CT saturation (b)

Следует отметить, что ложный дифференциальный ток, появляющийся вследствие изменения положения отпаек РПН и при протекании намагничивающего тока трансформатора, на осциллограммах и диаграммах не показан. Траектория перемещения точки с мгновенными координатами (I_{res} , I_{diff}), приведенная на рис. 5а, представляет собой параллельную оси абсцисс линию. Как и ожидалось, срабатывания ДЗТ в данном режиме не произошло, т. е. команда на отключение силовых выключателей не была сформирована.

Внешнее повреждение со стороны низшего напряжения силового трансформатора, сопровождающееся насыщением ТТ

Для исключения ложной работы ДЗТ при насыщении ТТ уставка срабатывания увеличивается пропорционально протекающему сквозному току, что позволяет иметь высокую чувствительность при повреждениях, сопровождающихся небольшими токами, а также исключает излишнее срабатывание при внешнем КЗ из-за насыщения магнитной системы измерительных ТТ. Вышесказанное справедливо при правильном выборе измерительного ТТ и правильно заданной характеристике цифровой ДЗТ.

Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (External fault). В этом случае произошло излишнее срабатывание ДЗТ при внешнем КЗ. Причиной срабатывания является дифференциальный ток (рис. 6b), появившийся вследствие насыщения ТТ со стороны низшего напряжения силового трансформатора. Насыщение ТТ приводит к неполной трансформации первичного тока во вторичные цепи ТТ, что и дает нарушение равенства токов со сторон ВН и НН, т. е. дифференциальный ток $I_{diff} = |i_{HV'} - i_{LV'}| \neq 0$. В данном режиме значение I_{diff} в первый момент времени практически равно нулю, и рабочая точка перемещается вправо по оси абсцисс. Однако по мере насыщения ТТ происходит перемещение рабочей точки в область срабатывания, при этом ее траектория имеет характерную петлевидную форму, что отображено на рис. 6a.

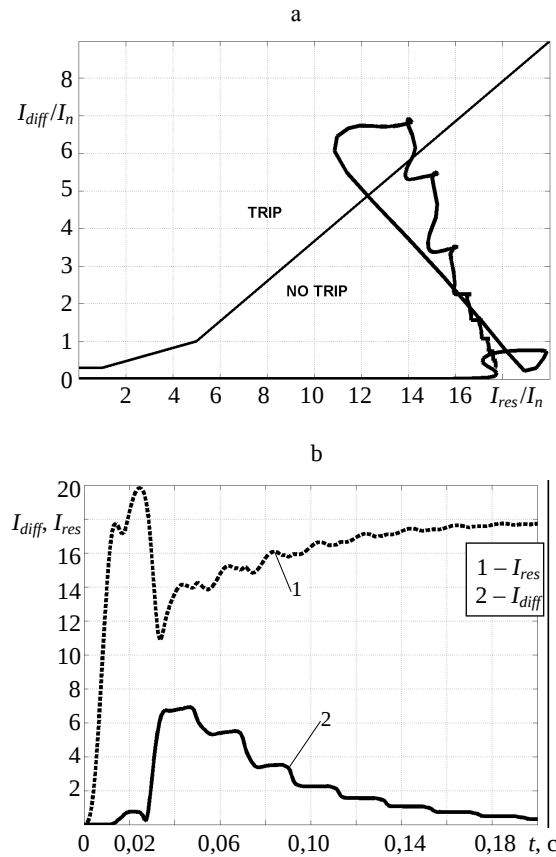


Рис. 6. Траектория перемещения рабочей точки при внешнем повреждении с насыщением ТТ (a); осциллограмма токов I_{diff} и I_{res} при внешнем повреждении с насыщением ТТ (b)

Fig. 6. Operating point trajectory during external fault with CT saturation (a); I_{diff} and I_{res} currents waveform during external fault with CT saturation (b)

Избежать излишнего срабатывания в данном случае можно следующими способами:

- 1) использовать ТТ с большей номинальной кратностью и (или) большей номинальной мощностью;
- 2) увеличить угол наклона третьего участка характеристики цифровой ДЗТ;
- 3) использовать специальные алгоритмы распознавания режима насыщения измерительных ТТ, которые блокируют работу цифровой ДЗТ или автоматически увеличивают наклон третьего участка характеристики до момента выхода ТТ из режима насыщения [8].

Режим перевозбуждения силового трансформатора

Режим перевозбуждения силового трансформатора возникает при определенном уровне повышения напряжения питания (относительно номинального) или при определенном уровне снижения его частоты (по отношению к номинальной), или при сочетании двух данных факторов. Данный режим сопровождается увеличением температуры конструктивных частей трансформатора, повышенным уровнем шума и вибрации.

Условие возникновения перевозбуждения со стороны обмотки ВН может быть описано следующим выражением [12]:

$$\frac{U}{f} > \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \right) K,$$

где U – текущее напряжение питания обмотки ВН трансформатора; f – частота текущего напряжения питания обмотки ВН; K – значение в относительных единицах магнитного потока в точке излома характеристики намагничивания.

Выполнение данного условия приводит к повышению магнитного потока до значений, вызывающих насыщение стального магнитопровода трансформатора, что, в свою очередь, обуславливает резкое увеличение тока намагничивания, воспринимаемого ДЗТ в качестве дифференциального (рабочего) тока. Указанное обстоятельство может привести к ложному срабатыванию защиты, так как перевозбуждение трансформатора в течение определенного времени не является аварийным режимом. Следовательно, работа ДЗТ при возникновении данного режима должна быть заблокирована, а отключение трансформатора должно происходить от специальной защиты с зависимой от U/f выдержкой времени.

Рассмотрим случай повышенного напряжения питания при номинальной частоте. Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатель стороны ВН (Breaker HV) включен, а выключатель стороны НН (Breaker LV) отключен. Для характеристики намагничивания моделируемого трехфазного трансформатора, заданной в соответствии с [3], резкое увеличение тока намагничивания будет происходить при превышении напряжением питания значения $1,15U_{1\text{ном}}$, при котором $K = 1,15$. Осцилло-

грамма вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при питании обмотки ВН трехфазного силового трансформатора трехфазным напряжением величиной $1,35U_{\text{ном}}$ представлена на рис. 7.

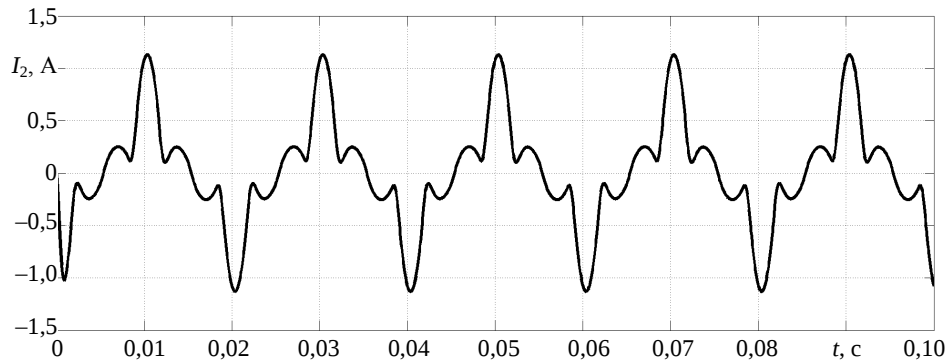


Рис. 7. Осциллограмма вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении трехфазного силового трансформатора

Fig. 7. A-phase secondary current waveform of the HV wye-connected CTs during three-phase power transformer overexcitation

Следует отметить, что режим перевозбуждения не сопровождается насыщением ТТ, так как протекающий через них ток имеет малую амплитуду и не содержит апериодической составляющей. Поэтому ТТ не вносят дополнительных гармонических составляющих во вторичный ток.

Гармонический состав вторичного тока ТТ имеет ярко выраженное процентное содержание нечетных гармоник по отношению к основной. Как видно из табл. 2, доминирующими являются 3-, 5- и 7-я гармоники. Однако в зависимости от схемы соединения обмотки силового трансформатора в протекающем со стороны подачи напряжения токе может отсутствовать 3-я гармоника [13].

Таблица 2

Гармонический состав вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении трехфазного силового трансформатора

A-phase secondary current harmonic content of the wye-connected CTs on the HV side during three-phase power transformer overexcitation

Номер гармоники	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Содержание, %	100	0,26	35,33	0,17	42,09	0,18	11,54	0,22	2,2

Принимая во внимание данную особенность, повышенное процентное содержание 5-й гармоники является наиболее достоверным показателем возникновения режима перевозбуждения. Поэтому блокирование работы ДЗТ при перевозбуждении силового трансформатора в цифровых устройствах защиты основано на сравнении процентного содержания 5-й гармоники с заданной уставкой. Характеристика изменения процентного содержания пятой гармоники ($I_5/I_{1 \text{ ratio}}, \%$) во времени приведена на рис. 8. После выделения цифровыми фильтрами за время, равное одному периоду про-

мышленной частоты процентного содержания 5-й гармоники, устанавливается ее истинное значение, которое превышает заданную уставку (threshold), что приводит к блокированию ДЗТ.

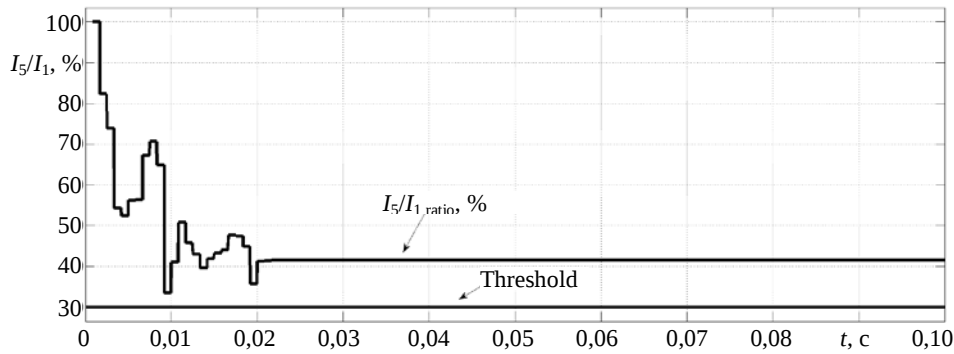


Рис. 8. Характеристика изменения процентного содержания 5-й гармоники во вторичном токе фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении трехфазного силового трансформатора

Fig. 8. A-phase secondary current fifth harmonic content (per cent of fundamental) of the HV wye-connected CTs during three-phase power transformer overexcitation

Бросок тока намагничивания

Данный режим, как и режим перевозбуждения, связан с резким возрастанием тока намагничивания силового трансформатора вследствие насыщения его магнитопровода. Причины возникновения броска тока намагничивания (БТН) в основном следующие: постановка ненагруженного трансформатора под напряжение, восстановление напряжения после ликвидации внешнего КЗ, включение параллельно работающего трансформатора.

Рассмотрим режим постановки ненагруженного трансформатора под напряжение со стороны ВН: выключатель стороны НН (Breaker LV) отключен, выключатель стороны ВН (Breaker HV) включается в момент подачи напряжения (рис. 3). В данном случае происходит скачкообразное изменение напряжения на зажимах силового трансформатора, что вызывает переходный процесс установления номинального магнитного потока. При этом результирующий магнитный поток будет являться суммой двух составляющих: установившейся и апериодической, затухающей с определенной постоянной времени. До момента затухания апериодической составляющей (установление номинального магнитного потока) значение результирующего магнитного потока может превосходить его номинальное значение, чем и обусловлено резкое возрастание тока намагничивания в данном режиме.

Максимальное значение БТН может превышать номинальный ток силового трансформатора в 5–10 раз [8]. Данное значение зависит от многих факторов: мощности трансформатора, постоянной времени питающей системы, фазы включения, остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора, наклона характеристики намагничивания в области насыщения. Осциллограмма первичного (сплошная линия) и приведенного

вторичного (штриховая линия) тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН представлена на рис. 9. Следует заметить, что в отличие от режима перевозбуждения БТН в каждой из фаз будет различен из-за отличия фаз напряжения в момент включения и, как следствие, разного значения аperiodической составляющей возникающего магнитного потока.

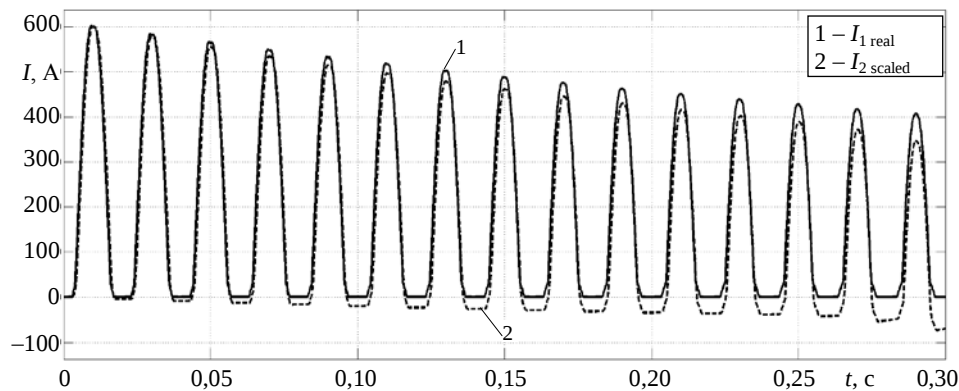


Рис. 9. Осциллограмма первичного тока (сплошная линия) и приведенного вторичного тока (штриховая линия) фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН

Fig. 9. A-phase primary current (solid line) and scaled secondary current (dashed line) waveform of the HV wye-connected CTs during three-phase magnetizing inrush

Для рассматриваемого на рис. 9 режима в связи с наличием длительно затухающей аperiodической составляющей характерно насыщение измерительных ТТ, что и является причиной искажения трансформируемого первичного тока. Данный факт обуславливает некоторое различие в гармоническом составе первичного и вторичного токов ТТ.

В режиме БТН, как и при перевозбуждении, ДЗТ воспринимает возникающий ток намагничивания как ток внутреннего КЗ, так как бросок тока возникает только со стороны питания. Однако отключения трансформатора в данном режиме происходить не должно.

Гармонический состав 1-го периода представленного на рис. 9 вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН приведен в табл. 3. Как видно из табл. 3, преобладающими по отношению к основной являются четная 2-я и нечетная 3-я гармоники.

Таблица 3

Гармонический состав 1-го периода вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН

A-phase 1st cycle secondary current harmonic content of the wye-connected CTs on the HV side during three-phase magnetizing inrush

Номер гармоники	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Содержание, %	100	20,2	10,7	1,74	2,6	1,28	1,2	0,6	0,02

Принимая во внимание, что процентное содержание 2-й гармоники – доминирующее по отношению ко всем остальным высшим гармоникам, содержащимся в рассматриваемом вторичном токе, и учитывая, что в зависимости от схемы соединения обмотки силового трансформатора со стороны питания 3-я гармоника может отсутствовать [13], то именно повышенное содержание 2-й гармоники является наиболее достоверным показателем возникновения режима БТН при неиспользовании в алгоритме иных признаков данного режима. Поэтому блокирование работы ДЗТ при БТН силового трансформатора в цифровых устройствах защиты основано на сравнении процентного содержания 2-й гармоники с заданной уставкой. Характеристика изменения процентного содержания 2-й гармоники (I_2/I_1 ratio, %) представленного на рис. 9 вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН приведена на рис. 10. Вычисляемое процентное содержание превышает заданную уставку (threshold), что приводит к блокированию ДЗТ в режиме БТН. Следует отметить, что по мере затухания БТН процентное содержание 2-й гармоники увеличивается.

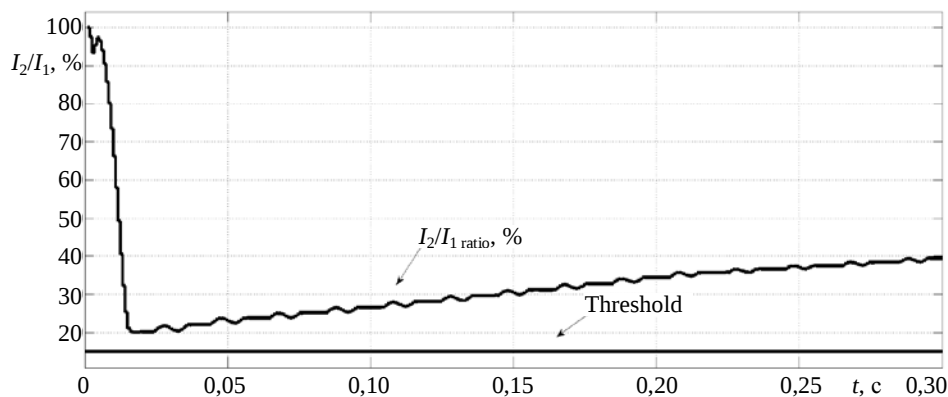


Рис. 10. Оциллограмма изменения процентного содержания 2-й гармоники во вторичном токе фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН

Fig. 10. A-phase secondary current second harmonic content (per cent of fundamental) of the HV wye-connected CTs during three-phase magnetizing inrush

Недостатки алгоритмов блокировки, основанных на гармоническом анализе

Стоит отметить, что наличие высших гармоник не всегда свидетельствует о возникновении режима перевозбуждения или БТН. Так, при КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, в их вторичном токе появляются высшие гармоники (нечетные – при токе КЗ без апериодической составляющей, четные и нечетные – при ее наличии). Поэтому алгоритмы блокировки, основанные на гармоническом анализе тока, могут вызывать замедление срабатывания ДЗТ при внутренних КЗ. Оциллограмма вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН защищаемого трансформатора при их насыщении вследствие протекания тока КЗ с апериодической составляющей при внутреннем КЗ приведена на рис. 11.

Режим работы модели (рис. 3) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1).

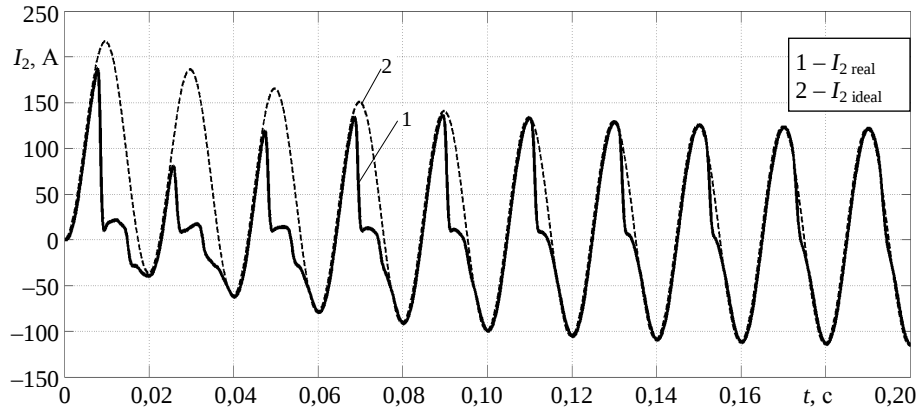


Рис. 11. Осциллограмма вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при их насыщении вследствие протекания тока КЗ с апериодической составляющей

Fig. 11. A-phase secondary current waveform of the HV wye-connected CTs in case of their saturation due to DC component presence in the short-circuit current

Характеристика изменения процентного содержания 2-й гармоники во вторичном токе фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН в рассматриваемом случае (рис. 11) приведена на рис. 12. Как видно из рис. 12, данный режим сопровождается ложным блокированием цифровой ДЗТ рассмотренным алгоритмом определения режима БТН. Время блокирования составляет около 0,155 с, или 7,75 периодов промышленной частоты.

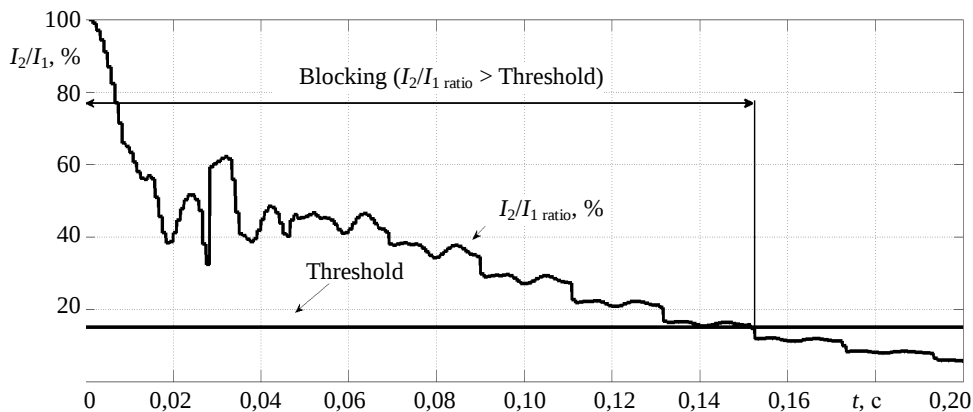


Рис. 12. Ложное блокирование работы ДЗТ при внутреннем КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, алгоритмом определения режима БТН

Fig. 12. False transformer differential protection operation blocking by “second harmonic blocking” algorithm in case of internal fault along with CT saturation

Для повышения надежности срабатывания цифровой ДЗТ следует использовать дополнительные способы идентификации аномальных режимов силового трансформатора, основанные, например, для режима БТН на: оценке отношения тока 2-й гармоники прямой последовательности к току основной гармоники обратной последовательности [14], оценке разности фаз между токами основной и 2-й гармоник [15] или идентификации режима по форме тока [16]. Перечисленные варианты в сочетании с традиционным способом блокировки по гармоническому составу позволят повысить быстродействие защиты при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением измерительных ТТ.

ВЫВОДЫ

1. Приведено детальное описание всех стадий цифровой обработки и фильтрации входных сигналов в цифровой дифференциальной защите силового трансформатора.
2. Разработана комплексная модель, позволяющая исследовать большинство характерных режимов функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора.
3. Продемонстрировано влияние насыщения измерительных трансформаторов тока на функционирование цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора.
4. Рассмотрены алгоритмы блокировки цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора при аномальных режимах его работы, отмечены их недостатки.
5. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о возможности применения среды динамического моделирования MatLab-Simulink как для анализа функционирования существующих цифровых устройств релейной защиты, так и для разработки и проверки алгоритмов функционирования новых устройств цифровой релейной защиты на этапе внедрения в производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sim Power Systems. User's Guide. Version 5 [Electronic Resource] // The MathWorks, 2011. Mode of Access: http://www.mathworks.com/help/releases/R2011a/pdf_doc/physmod/powersys/powersys.pdf. Date of Access: 01.12.2015.
2. Румянцев, Ю. В. Исследование надежности срабатывания цифровой дифференциальной защиты трансформатора в системе динамического моделирования MatLab-Simulink / Ю. В. Румянцев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики. Минск, 2015. С. 390–396.
3. 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.
4. Королев, Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. М.: Энергия, 1980. 207 с.

5. 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.
6. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 5. С. 23–38.
7. Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MatLab-Simulink / F. Romanyuk [et al.] // Przegląd Electrotechniczny. 2015. Vol. 91, No 11. P. 292–295.
8. Ziegler, G. Numerical Differential Protection: Principles and Applications / G. Ziegler. 2 edition. Erlangen, Germany: Publicis Publishing, 2012. 287 p.
9. IEEE Guide for Protecting Power Transformers: IEEE Standard. C 37.91–2008.
10. Benmouyal, G. Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering / G. Benmouyal // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. Vol. 10, No 2. P. 621–630.
11. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк [и др.] // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. Витебск: ВГТУ, 2015. Т. 1. С. 115–139.
12. Paithankar, Y. G. Fundamentals of Power System Protection / Y. G. Paithankar, S. R. Bhide. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2003. 287 p.
13. Madzikanda, E. A Practical Look at Harmonics in Power Transformer Differential Protection / E. Madzikanda, M. Negnevitsky // 2012 IEEE International Conference on Power System Technology. POWERCON 2012. Auckland, New Zealand. Article Number 6401274.
14. Романюк, Ф. А. Исследование алгоритма блокировки токовых защит трансформатора в режимах броска тока намагничивания / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, А. С. Гвоздицкий // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 2. С. 5–10.
15. Kulidjian, A. New Magnetizing Inrush Restraining Algorithm for Power Transformer Protection / A. Kulidjian, B. Kasztenny, B. Campbell // IEEE Developments in Power Sys. Protec. Conf. 2001. P. 181–184.
16. Guzman, A. Power Transformer Protection Improvements with Numerical Relays / A. Guzman, H. Altuve, D. Tziouvaras // CIGRE Study Committee B5 – Protection and Automation. 2005. Vol. 11.

Поступила 16.02.2016 Подписана в печать 15.04.2016 Опубликовано онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Sim Power Systems. User's Guide. Version 5. *The MathWorks* (2011). Available at: http://www.mathworks.com/help/releases/R2011a/pdf_doc/physmod/powersys/powersys.pdf. (Accessed: 1 December 2015).
2. Rumiantsev Yu. V. (2015) The Study of the Transformer Digital Differential Protection Operation Reliability in the MatLab-Simulink Environment. *The Methodic Problems of the Reliability of Large Systems of Power Production. Issue 66. Actual Problems of Reliability of Energy Systems*, 390–396 (in Russian).
3. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) Three-Phase Transformer Parameters Calculation Considering the Core Saturation for the MatLab-Simulink Transformer model. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obiedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (1), 12–24 (in Russian).
4. Koroliev Ye. P., Liberzon E. M. (1980) *Calculations of the Allowable Loads in the Current Circuits of Relay Protection*. Moscow, Energiya. 207 (in Russian).
5. Romanyuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automatics of Power Production Systems*. Minsk, VUZ-UNITI. 174 (in Russian).
6. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh*

- Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (5), 23–38 (in Russian).
7. Romanyuk F. A., Novash I., Rumiantsev Yu., Węgierek P. (2015) Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MatLab-Simulink. *Przegląd Electrotechniczny*, 91 (11), 292–295. DOI: 10.15199/48.2015.11.67.
 8. Ziegler G. (2012) *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. 2 ed. Erlangen, Germany, Publicis Publishing. 287.
 9. IEEE Guide for Protecting Power Transformers: IEEE Standard C 37.91–2008.
 10. Benmouyal G. (1995) Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10 (2), 621–630. DOI: 10.1109/61.400869.
 11. Romaniuk F. A., Novash I. V., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2015) Perspective Technologies in the Distribution Lines Digital Protection. V. V. Klubovich (ed.) *Prospective Materials and Technologies*. Vol. 1. Vitebsk: VSTU, 115–139 (in Russian).
 12. Paithankar Y. G., Bhide S. R. (2003) *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, Prentice-Hall of India Private Limited. 287.
 13. Madzikanda E. A., Negnevitsky M. (2012) Practical Look at Harmonics in Power Transformer Differential Protection. *2012 IEEE International Conference on Power System Technology. POWERCON 2012*. Auckland, New Zealand. Article Number 6401274. DOI: 10.1109/PowerCon.2012.6401274.
 14. Romaniuk F. A., Loman M. S., Gvozditkiy A. S. (2014) Investigation of Blocking Algorithm for Transformer Current Protections in Magnetizing Inrush Current Modes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (2), 5–10 (in Russian).
 15. Kulidjian A., Kasztenny B., Campbell B. (2001) New Magnetizing Inrush Restraining Algorithm for Power Transformer Protection. *IEEE Developments in Power Sys. Protec. Conf.*, 181–184.
 16. Guzman A., Altuve H., Tziouvaras D. (2005) Power Transformer Protection Improvements with Numerical Relays. *CIGRE Study Committee B5 – Protection and Automation*. Vol. 11.

Received: 16.02.2016

Accepted: 15.04.2016

Published online: 03.06.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-225-234

УДК 620.921(261.24) (08)

Обеспечение качества электрической энергии в системе электроснабжения при параллельной работе с ветроустановкой

Ю. А. Ролик¹⁾, А. В. Горностай²⁾

¹⁾Институт транспорта и связи (Рига, Латвийская Республика),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассматривается проблема обеспечения качества электрической энергии в системах электроснабжения, где используются достаточно протяженные воздушные или кабельные линии электропередачи. Показано, что эта проблема приобретает особую актуальность в системах электроснабжения, в которых одним из источников электрической энергии является генератор ветроустановки, поскольку первичный источник энергии – ветер – обладает собственной нестабильностью. Определение степени автоматизации регулирования напряжения в системах электроснабжения сводится к выбору способов и средств регулирования параметров качества электроэнергии. Понятие потери напряжения и ее причины поясняются простейшей системой электроснабжения, представленной однолинейной схемой. Регулирование напряжения предлагается осуществлять путем изменения параметров электрической сети с использованием способа снижения потерь напряжения в линии за счет уменьшения ее реактивного сопротивления. Последнее достигается с помощью продольной емкостной компенсации индуктивного сопротивления линии. Достижимый эффект проиллюстрирован векторными диаграммами токов и напряжений в схемах замещения линии электропередачи с использованием и без использования продольной емкостной компенсации. На основе анализа приведенных формул показано, что такой способ регулирования целесообразен только в системах электроснабжения с относительно низким коэффициентом мощности ($\cos\varphi < 0,7\text{--}0,9$). Такой коэффициент мощности типичен при включении в сеть ветроустановки с асинхронным генератором из-за существующей в природе нестабильности скорости ветра. Регулирование напряжения предлагаемым способом в данной ситуации позволит обеспечить требуемое качество напряжения на шинах потребителей. Это, в свою очередь, позволит создать необходимые условия для экономичной передачи электрической энергии с наименьшими затратами реактивной и потерями активной мощности.

Ключевые слова: ветроустановка, качество электрической энергии, регулирование напряжения, система электроснабжения, однолинейная схема, эквивалентная схема замещения, продольная емкостная компенсация

Для цитирования: Ролик, Ю. А. Обеспечение качества электрической энергии в системе электроснабжения при параллельной работе с ветроустановкой / Ю. А. Ролик, А. В. Горностай // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 225–234

Адрес для переписки

Горностай Александр Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Address for correspondence

Gornostay Alexander V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Providing Quality of Electric Power in Electric Power System in Parallel Operation with Wind Turbine

Yu. A. Rolik¹⁾, A. V. Gornostay²⁾

¹⁾Transport and Telecommunication Institute (Riga, Latvian Republic),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The problem of providing electric power quality in the electric power systems (EPS) that are equipped with sufficiently long air or cable transmission lines is under consideration. This problem proved to be of particular relevance to the EPS in which a source of electrical energy is the generator of wind turbines since the wind itself is an instable primary energy source. Determination of the degree of automation of voltage regulation in the EPS is reduced to the choice of methods and means of regulation of power quality parameters. The concept of a voltage loss and the causes of the latter are explained by the simplest power system that is presented by a single-line diagram. It is suggested to regulate voltage by means of changing parameters of the network with the use of the method of reducing loss of line voltage by reducing its reactance. The latter is achieved by longitudinal capacitive compensation of the inductive reactance of the line. The effect is illustrated by vector diagrams of currents and voltages in the equivalent circuits of transmission lines with and without the use of longitudinal capacitive compensation. The analysis of adduced formulas demonstrated that the use of this method of regulation is useful only in the systems of power supply with a relatively low power factor ($\cos\varphi < 0.7$ to 0.9). This power factor is typical for the situation of inclusion the wind turbine with asynchronous generator in the network since the speed of wind is instable. The voltage regulation fulfilled with the aid of the proposed method will make it possible to provide the required quality of the consumers' busbars voltage in this situation. In its turn, it will make possible to create the necessary conditions for the economical transmission of electric power with the lowest outlay of reactive power and the lowest outlay of active power losses.

Keywords: wind turbine, electric power quality, voltage regulation, electrical power system, single line diagram, equivalent circuit, longitudinal capacitive compensation

For citation: Rolik Yu. A., Gornostay A. V. (2016) Providing Quality of Electric Power in Electric Power System in Parallel Operation with Wind Turbine. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 225–234 (in Russian)

Введение

Основу существующих систем электроснабжения (СЭС) объектов различного назначения, кроме источников электрической энергии, например ветроустановок (ВЭУ), составляют широко разветвленные воздушные или кабельные электрические сети напряжением 30, 20 или 10 кВ [1]. Из-за большой протяженности этих сетей напряжение у потребителей электроэнергии, если не применять дополнительных мер, будет отличаться от номинального значения [2]. Поэтому по мере усложнения структуры и укрупнения электрических сетей за счет новых вводимых источников возобновляемой энергии возникает проблема качества электроэнергии [3–5]. Поддерживать качество электрической энергии на необходимом уровне призваны специально разработанные для этих целей устройства и способы регулирования режимов работы СЭС [6].

Основными функциями таких устройств являются:

1) поддержание на заданном уровне частоты и напряжения в узловых точках энергосистемы в нормальном и в послеаварийном режимах работы. Это обеспечивается за счет автоматического регулирования напряжения

в электрических сетях, а также автоматического регулирования возбуждения и частоты синхронных генераторов электрических станций [7];

2) экономически выгодное распределение активных и реактивных нагрузок между параллельно работающими агрегатами СЭС и ВЭУ и поддержание оптимального состава работающих агрегатов с целью обеспечения резерва мощности в системе;

3) повышение надежности работы ВЭУ путем предотвращения нарушений нормального режима и ускорения ликвидации возникающих аварийных ситуаций;

4) обеспечение бесперебойности электроснабжения за счет параллельной работы преобразователей автоматизированных систем гарантированного электроснабжения.

Необходимость регулирования напряжения в СЭС

Необходимость регулирования напряжения в СЭС, в которых ВЭУ работает параллельно с сетью, обусловлена требованиями потребителей к качеству электроэнергии. В соответствии с существующими требованиями основными параметрами, определяющими качество электроэнергии, являются: установившееся отклонение напряжения, отклонение частоты, размах изменения напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой междофазного (фазного) напряжения и др. Наибольшей изменчивости подвержено напряжение в отдельных узлах электрической сети, причем его изменение оказывает наиболее сильное влияние на работу потребителей. Причины появления и характер влияния отклонений и колебаний напряжения на работу приемников электрической энергии различны и подробно рассмотрены в [8].

Отклонения напряжения вызываются в основном изменениями режима работы потребителей и характеризуют качество напряжения на шинах приемников электрической энергии в статических режимах. Отклонение напряжения ΔU_i в i -й точке сети определяется как разность между фактическим значением напряжения U_i и его номинальным значением $U_{\text{ном}}$ при сравнительно медленном изменении режима работы, выраженная в процентах от значения $U_{\text{ном}}$

$$\Delta U_i = \frac{U_i - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \%. \quad (1)$$

Каждый приемник электрической энергии имеет наилучшие технико-экономические показатели при определенном напряжении на его зажимах. Отклонение напряжения от номинального значения приводит к изменению технико-экономических показателей и при определенных значениях может вызвать нарушение работоспособности. Одновременно отклонения напряжения снижают экономичность работы электрической сети за счет изменения потерь мощности и энергии. Таким образом, отклонения напряжения

в отдельных точках сети оказывают влияние на всю СЭС и на объект в целом [9]. Особенно важным становится обеспечение качества электрической энергии, вырабатываемой с помощью ВЭУ, поскольку первичный источник энергии – ветер – обладает собственной нестабильностью.

Причины возникновения потери напряжения

Понятие «потеря напряжения» и ее причины поясняются простейшей системой электроснабжения, представленной однолинейной схемой на рис. 1а. Здесь передача энергии от ВЭУ к потребителям (П1–П3) осуществляется по воздушным и кабельным линиям электропередачи (Л1–Л3). Эквивалентная схема замещения линии Л1 представлена на рис. 1б, где $R_{\text{л}}$ и $x_{\text{л}}$ – соответственно эквивалентные активное и реактивное сопротивления линии электропередачи и трансформаторов Т1 и Т2, а $I_{\text{л}}$ – ток в линии, равный току нагрузки $I_{\text{н}}$.

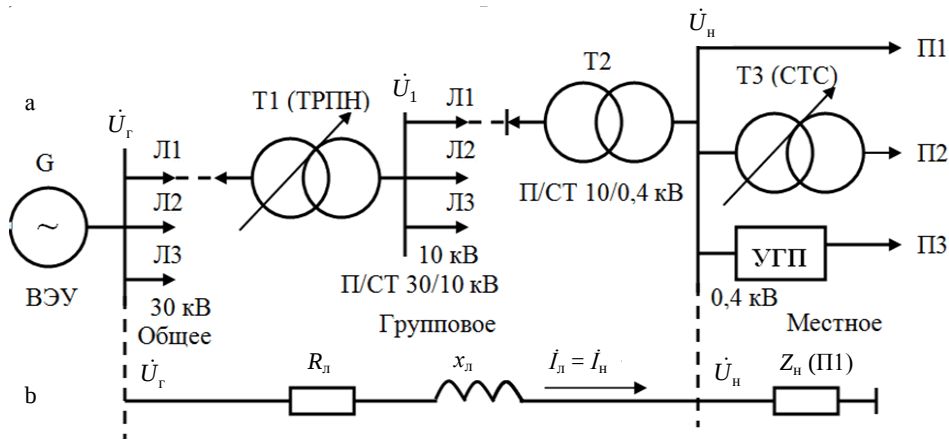


Рис. 1. Упрощенная схема системы электроснабжения:
а – однолинейная схема; б – эквивалентная схема замещения

Fig. 1. Simplified scheme of the electric power system:
а – single line scheme; б – equivalent circuit

На рассматриваемом участке сети от ВЭУ до потребителя имеет место падение напряжения на активном $R_{\text{л}}$ ($R_{\text{л}} I_{\text{л}}$) и реактивном $x_{\text{л}}$ ($jx_{\text{л}} I_{\text{л}}$) сопротивлениях, которые обусловлены протеканием тока в линии $I_{\text{л}} = I_{\text{н}}$. В результате величина напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$ будет меньше напряжения на шинах ВЭУ $U_{\text{г}}$ на величину потерь напряжения $U'_{\text{л}}$.

Для определения $U'_{\text{л}}$ рассмотрим векторную диаграмму для токов и напряжений в линии (рис. 2) согласно схеме замещения (рис. 1б). Напряжение на шинах ВЭУ составляет

$$\dot{U}_{\text{г}} = \dot{U}_{\text{н}} + R_{\text{л}} \dot{I}_{\text{л}} + jx_{\text{л}} \dot{I}_{\text{л}} = \dot{U}_{\text{н}} + Z_{\text{л}} \dot{I}_{\text{л}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{л}}$ – полное сопротивление линии; $Z_{\text{л}} \dot{I}_{\text{л}}$ – суммарное падение напряжения в линии.

[illegible]

Тогда из векторной диаграммы следует, что

где I_a , I_p — соответственно активная и реактивная составляющие тока в линии.

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{R_{\text{л}} P + x_{\text{л}} Q}{U_{\text{н}}}, \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует, что потери напряжения в линии зависят от сопротивлений линии $R_{\text{л}}$ и $x_{\text{л}}$, изменения тока нагрузки $I_{\text{н}} = I_{\text{л}}$ и потребляемой мощности. В результате напряжение на шинах приемников электрической энергии $U_{\text{н}}$ не остается постоянным, и для протяженных электрических сетей с несколькими ступенями трансформации потери напряжения в линии могут достигать 20–40 %. Это означает, что без применения специальных мер по регулированию напряжения обеспечить требуемое качество напряжения на шинах нагрузки в СЭС практически невозможно.

Регулирование напряжения в СЭС – это принудительное его изменение специальными способами и средствами с целью обеспечения требуемого

качества напряжения на зажимах приемников электрической энергии для эффективного их использования, а также создания условий для экономической передачи электроэнергии с наименьшими затратами реактивной и потерями активной мощности. Особенно остро необходимость регулирования напряжения возникает в разветвленных электрических сетях при параллельной работе с ВЭУ. Это происходит ввиду следующих особенностей:

- малой удельной плотности нагрузок;
- значительной протяженности воздушных и кабельных линий;
- существенного различия в нагрузках при разных режимах работы потребителей электроэнергии.

В зависимости от структуры электрической сети, количества потребителей и протяженности линий электропередачи применяют следующие виды регулирования (рис. 1а): централизованное (общее и групповое) и децентрализованное (местное). Общее регулирование осуществляют в центрах питания с помощью электрических станций или подстанций. Такое регулирование приводит к изменению напряжения во всей распределительной сети и может быть применено для однородных потребителей, находящихся примерно в равных условиях и имеющих совпадающие по времени графики нагрузок. Групповое регулирование применяют для неоднородных потребителей. Оно осуществляется в основном с помощью регулируемых трансформаторов (Т1, рис. 1а) для каждой отдельной линии или нескольких однородных линий, отходящих от центра питания.

Чем дальше потребитель удален от источника питания, тем труднее обеспечить заданное качество напряжения на его шинах. В этом случае применяют децентрализованное регулирование. Оно может осуществляться с помощью силовых стабилизаторов (ТЗ, рис. 1а), устанавливаемых на отдельных участках линии или непосредственно на шинах потребителей. При этом для ответственных потребителей применяют установки гарантированного питания (УГП).

Местное регулирование является более сложным. Поэтому его применяют в том случае, когда необходимо обеспечить электроснабжение приемников электрической энергии первой категории. В схеме рис. 1а при передаче электроэнергии от ВЭУ к потребителям осуществляется трехступенчатое регулирование напряжения с помощью электрического генератора ВЭУ (G), регулируемого трансформатора Т1, силового стабилизатора ТЗ и УГП. При этом для реализации того или иного вида регулирования напряжения в СЭС применяют следующие способы:

- принудительное изменение напряжения на питающем конце линии – генераторе ВЭУ;
- изменение параметров электрической сети за счет компенсации ее реактивного сопротивления;
- генерирование реактивной мощности в определенных точках СЭС.

Рассматриваемые способы могут быть реализованы различными средствами. Первый способ регулирования является основным. Он обеспечивается за счет регулирования напряжения асинхронных генераторов ВЭУ

с помощью батарей компенсирующих конденсаторов [10] и использования регулируемых трансформаторов для подключения ВЭУ к СЭС. Последние два способа – дополнительные, но их необходимо применять совместно с первым, так как в ряде случаев батареи компенсирующих конденсаторов асинхронных генераторов ВЭУ из-за большой дискретности регулирования не обеспечивают достаточного качества электроэнергии.

При втором способе регулирования в линию электропередачи последовательно с нагрузкой включают реакторы или конденсаторы последовательно-емкостной компенсации (рис. 3а). Генерирование реактивной мощности обеспечивается за счет подключения параллельно нагрузке различных компенсирующих устройств (конденсаторов, силовых дросселей, синхронных компенсаторов). Выбор того или иного способа регулирования осуществляют на основании технико-экономических расчетов. Определение степени автоматизации регулирования напряжения в СЭС сводится к выбору способов и средств регулирования параметров качества электроэнергии.

Регулирование напряжения за счет изменения параметров электрической сети

При данном способе регулирования напряжения снижение его потерь в линии достигается за счет уменьшения ее реактивного сопротивления x_L . Для этой цели последовательно с линией, обладающей индуктивным сопротивлением x_L , включается конденсатор с емкостным сопротивлением x_C (рис. 3а). В результате уменьшается суммарное реактивное сопротивление линии $x_n = x_L - x_C < x_L$. Если сопротивление линии имеет емкостный характер (кабельные линии электропередачи), то последовательно с ней включают реактор, обладающий реактивным сопротивлением, который также изменяет параметры электрической сети в сторону уменьшения общего сопротивления линии.

Схема замещения линии с продольной емкостной компенсацией представлена на рис. 3а, а соответствующая ей векторная диаграмма токов и напряжений – на рис. 3с. На рис. 3б приведена векторная диаграмма этой же линии без компенсации. Из сопоставления векторных диаграмм рис. 3б и 3с видно, что $\Delta U' < \Delta U$. Выражение для определения $\Delta U'$ по аналогии с соотношением (3) будет иметь следующий вид:

$$\Delta U' \approx \dot{I}_a R_L + (x_L - x_C) \dot{I}_p, \quad (5)$$

где $\dot{I}_a$, $\dot{I}_p$ – соответственно активная и реактивная составляющие тока в линии.

Как следует из рис. 3с, напряжение на нагрузке U'_n возросло на величину надбавки δU_k , которую можно определить по формуле

$$\delta U_k = \left(1 + \frac{\Delta U_1}{100}\right) \left(\frac{1}{\cos \varphi_n} - 1\right), \quad (6)$$

где ΔU_1 – отклонение напряжения U_1 на питающем конце линии (ВЭУ).

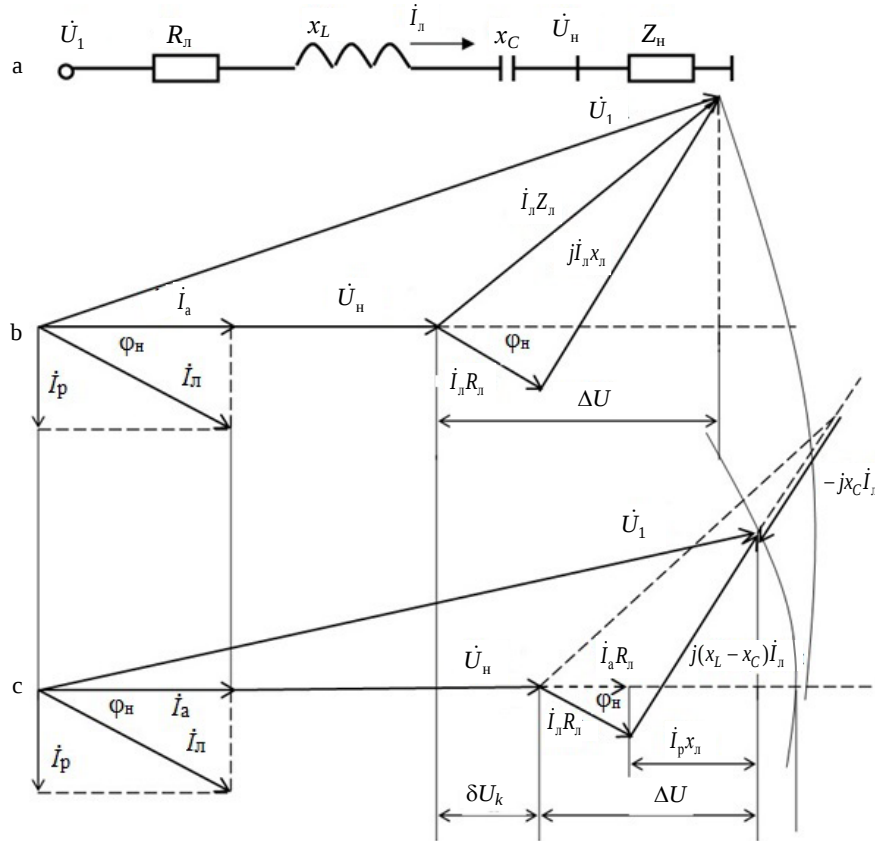


Рис. 3. Продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления линии:
а – эквивалентная схема замещения; б – векторная диаграммы токов и напряжений без компенсации; с – то же с емкостной компенсацией

Fig. 3. The longitudinal capacitive compensation of the inductive reactance of the line:
а – equivalent circuit; б – vector diagram of currents and voltages without compensation;
с – vector diagram of currents and voltages with capacitive compensation

Из (5) и (6) следует, что эффективное использование продольной емкостной компенсации возможно лишь при достаточно больших реактивных токах I_p и малых значениях $\cos \varphi_n$. При этом если $\cos \varphi_n = 1$, т. е. $I_p = 0$, то потеря напряжения в линии будет определяться только активным сопротивлением R_l , а надбавка $\delta U_k = 0$. В этом случае продольная емкостная компенсация окажется бесполезной. Поэтому использование такого способа регулирования целесообразно только в СЭС с относительно низким коэффициентом мощности ($\cos \varphi_n \leq 0,7-0,9$), который типичен при парал-

лельной работе с ВЭУ из-за существующей нестабильности скорости ветра.

Таким образом, регулирование напряжения при параллельной работе ВЭУ с асинхронным генератором в СЭС за счет изменения параметров электрической сети позволит обеспечить требуемое качество напряжения на шинах потребителей и создать необходимые условия для экономической передачи электрической энергии с наименьшими затратами реактивной и потерями активной мощности.

ВЫВОДЫ

1. Продольная компенсация не требует специального автоматического регулятора, так как при изменении тока нагрузки изменяется компенсирующее напряжение, которое соответствующим образом нивелирует появившуюся потерю напряжения.

2. Продольная емкостная компенсация является безынерционным средством регулирования, поскольку скорость нарастания падения напряжения на реактивном сопротивлении практически равна скорости нарастания тока компенсации.

3. Применение продольной компенсации целесообразно при параллельной работе с ветроустановкой в высоковольтных электрических сетях напряжением 10, 20 и 30 кВ.

4. Продольную компенсацию особенно выгодно использовать в системах электроснабжения с низким коэффициентом мощности и изменяющимся режимом нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ролик, Ю. А. Обеспечение бесперебойности электроснабжения ветроэлектростанций путем совершенствования способов контроля исправности масляных трансформаторов / Ю. А. Ролик, А. В. Горноста́й // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 4. С. 21–27.
2. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии: справочник-каталог / В. И. Виссарионов [и др.]. М.: Фирма «ВИЭН», 2004. 448 с.
3. Twidell, J. W. Renewable Energy Resources / J. W. Twidell, D. W. Anthony. London: Taylor & Francis, 2006. 601 p.
4. Удалов, С. Н. Возобновляемые источники энергии / С. Н. Удалов. 3-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 459 с.
5. Лукутин, Б. В. Возобновляемые источники энергии / Б. В. Лукутин. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. 187 с.
6. Лукутин, Б. В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении / Б. В. Лукутин, О. А. Суржикова, Е. Б. Шандарова. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
7. Сибикин, Ю. Д. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. М.: РадиоСофт, 2008. 228 с.
8. Автоматизация энергетических систем / О. П. Алексеев [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1994. 448 с.
9. Толшин, В. И. Автоматизация судовых энергетических установок / В. И. Толшин, В. А. Сизых. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ТРАНСЛИТ, 2006. 352 с.

10. Квитко, А. В. Генераторы электроэнергии ветроэлектрических установок и способы стабилизации их напряжения / А. В. Квитко, А. О. Хицкова // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 98. С. 24–36.

Поступила 17.11.2015. Подписана в печать 19.01.2016 Опубликована онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Rolik Yu. A., Gornostay A. V. (2010) Continuity of Electric Power Supply of Wind Power by Improving the Methods of Testing of Oil Transformers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (4), 21–27 (in Russian).
2. Vissarionov V. I., Belkina S. V., Deriugina G. V., Kuznetsova V. A., Malinin N. K. (2004) *Energy Equipment for the use of Alternative and Renewable Power Sources. A Guide-Catalogue*. Moscow, Firm VIEN. 448 (in Russian).
3. Twidell J. W., Anthony D. W. (2006) *Renewable Energy Resources*. London, Taylor & Francis. 601.
4. Udalov S. N. (2014) *Renewable Power Sources*. 3rd ed. Novosibirsk: NSTU Publ. 459 (in Russian).
5. Lukutin B. V. (2008) *Renewable Power Sources*. Tomsk: Tomsk Polytechnic Univ. Publ. 187 (in Russian).
6. Lukutin B. V., Surzhikova O. A., Shandarova Ye. B. (2008) *Renewable Power Engineering in a Decentralized Supply*. Moscow: Energoatomizdat. 231 (in Russian).
7. Sibikin Yu. D., Sibikin M. Yu. (2008.) *Unconventional Renewable Power Sources*. Moscow, RadioSoft. 228 (in Russian).
8. Alekseev O. P., Kozis V. L., Krivenkov V. V., Morozkin V. P., Ovcharenko N. I., Ornov V. G., Panfilov N. I., Rozhkov M. G., Semenov V. A., Engelage D. (1994) *Automation of Power Systems*. Moscow: Energoatomizdat. 448 (in Russian).
9. Tolshin V. I., Sizyh V. A. (2006) *Automation of Marine Power Plants*. 3rd ed. Moscow: TRANSLIT. 352 (in Russian).
10. Kvitko A. V., Hitskova A. O. (2014) The Generators of Wind Power Plants and Ways to Stabilize their Voltage. *Nauchnyy Zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of Kuban State Agricultural University], (98), 24–36 (in Russian).

Received: 17.11.2015

Accepted: 19.01.2016

Published online: 03.06.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-235–248

УДК 621.311.22:621.175

Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций

Часть 1

Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский¹⁾, Н. В. Широглазова²⁾,
А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская³⁾

¹⁾Филиал «Гомельская ТЭЦ-2» РУП «Гомельэнерго» (Гомель, Республика Беларусь),

²⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(Гомель, Республика Беларусь),

³⁾РУП «БелНИПИэнергопром» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Для снижения температуры охлаждающей воды и повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов приведены основные направления перевооружения систем технического водоснабжения с градирнями тепловых электростанций. Рассмотрены проблемы эксплуатации оросительных и водораспределительных систем башенных градирен. Проанализированы конструкции применяемых теплообменников устройств, их недостатки и влияние на охлаждающую способность градирни. Применение капельного теплообменного устройства на основе решетчатого полипропилена практически исключает недостатки пленочных и капельно-пленочных теплообменников устройств градирен, что приводит к увеличению срока эксплуатации, а также повышению надежности и экономичности работы основного оборудования тепловых электростанций. Рассмотрены конструкции водораспределительных устройств градирен. Отмечено, что наиболее эффективными являются низконапорные водоразбрызгивающие сопла из полипропилена, которые обеспечивают равномерное распыление воды и имеют высокую надежность и долговечность.

Ключевые слова: тепловые электростанции, система технического водоснабжения, градирни, ороситель, сопла, охлаждающая способность

Для цитирования: Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций. Часть 1 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Н. В. Широглазова, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 235–248

Адрес для переписки

Зенович-Лешкевич-Ольпинский Юрий Аркадьевич
Филиал «Гомельская ТЭЦ-2»
РУП «Гомельэнерго»,
просп. Энергостроителей, 2,
247010, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 42-77-88
y.leshkevich@gomelenergo.by

Address for correspondence

Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yuriy A.
Branch “Gomel CHP-2” of the “Gomel-yenergo” Republican Unitary Enterprise,
2 Energostroyiteleyi Ave.,
247010, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 42-77-88
y.leshkevich@gomelenergo.by

Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Steam Power Plants Technical and Economic Indicators Perfection

Part 1

Yu. A. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy¹⁾, N.V. Shiroglazova²⁾,
A. Yu. Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya³⁾

¹⁾Branch "Gomel CHP-2" of the "Gomelyenergo" Republican Unitary Enterprise
(Gomel, Republic of Belarus),

²⁾Gomel State Technical University Named After P.O. Sukhoi (Gomel, Republic of Belarus),

³⁾"BelNPIenergoprom" Republican Unitary Enterprise (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In order to reduce the temperature of cooling water and increase the efficiency of use of power resources the main directions of modernization of systems of technical water supply with cooling towers at steam power plants are presented. The problems of operation of irrigation systems and water distribution systems of cooling towers are reviewed. The design of heat and mass transfer devices, their shortcomings and the impact on the cooling ability of the cooling tower are also under analysis. The use of droplet heat and mass transfer device based on the lattice polypropylene virtually eliminates the shortcomings of the film and droplet-film heat and mass transfer devices of the cooling tower, increasing lifetime, and improving the reliability and efficiency of the operation of the main equipment of thermal power plants. The design of the water distribution devices of cooling towers is also considered. It is noted that the most effective are water-splattering low-pressure nozzles made of polypropylene that provides uniform dispersion of water and are of a high reliability and durability.

Keywords: steam power plants, technical water supply system, cooling towers, sprinkler, nozzles, cooling capacity

For citation: Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A., Shiroglazova N. V., Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya A. Yu. (2016) Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Steam Power Plants Technical and Economic Indicators Perfection. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 235–248 (in Russian)

Введение

Одной из главных задач экономики в энергетике является постоянное и непрерывное повышение энергоэффективности, в первую очередь – на действующих и строящихся тепловых электростанциях (ТЭС) и атомных электростанциях (АЭС). Концерн Duke Energy (США) назвал энергоэффективность «пятым видом топлива» – наряду с углем, природным газом, атомной энергией и возобновляемыми источниками. Повышение энергоэффективности неразрывно связано с внедрением технологий, снижающих воздействие на экологическую среду через системы топливоприготовления, газоудаления и системы технического водоснабжения (СТВ) с градирнями.

СТВ – это основное технологическое устройство низкочастотной части ТЭС и АЭС, а также промышленных предприятий независимо от профиля производства. СТВ выполняют функцию определенного регулятора эмиссии вредных и парниковых газов, состояния природных источни-

ков воды, изменений микроклимата, эффективности и экономичности ТЭС и АЭС, промышленных предприятий. Через природные гидроохладители и градирни в окружающую среду отдается до 60 % тепловой энергии, полученной в результате сжигания топлива для выработки электроэнергии. Для сравнения: через дымовые трубы отдается до 10 % тепловой энергии [1].

В структуре производства электроэнергии ТЭС представлены теплоэлектроцентралями (ТЭЦ) и государственными районными электростанциями (ГРЭС). На ТЭЦ в основном используются оборотные СТВ с башенными (без вентиляторов) градирнями испарительного типа. На действующих ГРЭС в качестве охладителей воды чаще используются реки, водохранилища и озера, т. е. применяется прямоточная СТВ, иногда оборотная СТВ, например с прудами-охладителями [2].

Анализ результатов обследований и технологических испытаний градирен и СТВ выявил, что охлаждение воды в системах хуже нормативного в среднем на 2–10 °С, а недостаток воды для обеспечения охлаждения расчетных объемов пара в конденсаторах турбин составляет 30–40 % [3]. Градирни – наиболее распространенные компактные искусственные гидроохладители, позволяющие размещать электрические станции на значительном расстоянии от источников воды, на территории городов, вблизи от энергопотребителей. От совершенства СТВ и градирен, при прочих равных условиях, зависят величины удельных расходов топлива и выбросов вредных газов CO₂, NO_x, SO₂ в окружающую среду. Соответственно, чем ниже температура охлаждающей воды, тем меньше расход топлива и выбросы в атмосферу.

Постановка задачи

Цель настоящей работы – обоснование экономической целесообразности и оценка результатов реконструкции водораспределительной и оросительной системы башенной градирни для повышения эффективности СТВ и улучшения технико-экономических показателей электростанции.

СТВ блоков Гомельской ТЭЦ-2 – оборотная, с двумя башенными градирнями площадью орошения по 3200 м² каждая (рис. 1). Для подачи воды в конденсаторы турбин, на теплообменники вспомогательного оборудования и градирни в объединенной насосной станции (ОНС) установлено пять циркуляционных насосов типа Д-12500-24 электрической мощностью 1000 кВт каждый. Охлаждающая вода поступает по двум бетонным каналам в аванкамеру ОНС и затем из аванкамеры по пяти стальным трубопроводам к каждому циркуляционному насосу [4].

Насосы подают воду на магистральные водоводы, от которых вода по напорным трубопроводам поступает на основной и встроенный пучки конденсаторов. После конденсаторов вода по сливным магистральным трубопроводам направляется в градирни.

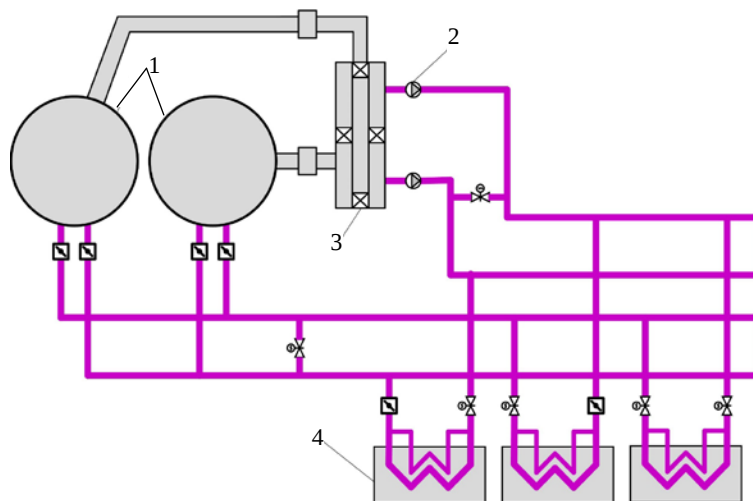


Рис. 1. Принципиальная схема технического водоснабжения:
1 – градирни № 1, 2; 2 – циркуляционный насос; 3 – аванкамера; 4 – конденсатор

Fig. 1. Schematic diagram of technical water supply:
1 – cooling towers No 1, 2; 2 – circulating pump; 3 – forebay; 4 – condenser

Охлаждение циркуляционной воды происходит в градирнях. Горячая вода разбрызгивается над оросителем, обладающим большой площадью поверхности и, стекая по нему, отдает теплоту в воздушный поток. При этом имеет место испарение воды, и относительная влажность воздуха приближается к 100 %. Теплота испарения влаги изымается из потока воды, приводя к снижению ее температуры. Далее вода в капельно-струйном виде попадает в бассейн башенно-испарительной градирни и направляется обратно в конденсаторы. Расход охлаждающей воды в современных тепловых станциях достигает 100 тыс. т/ч, при этом до 1,5–2,0 % воды может теряться в процессе испарения [5–9].

Градирни № 1, 2 сооружены по типовому проекту Санкт-Петербургского института «Атомэнергопроект» и введены в эксплуатацию соответственно в 1986 и 1988 гг. Градирни оборудованы оросителями из плоских асбестоцементных листов. Асбестоцементные листы оросителей предварительно собраны в блоки. Расстояние в свету между листами в обеих градирнях составляет 25 мм. Ороситель градирни № 1 – пленочный, одноярусный, высотой 2,5 м, градирни № 2 – двухъярусный, общей высотой 2,4 м.

Водоразбрызгивающие сопла систем водораспределения градирен – ударного типа с перфорированным чашечным отражателем с разбрызгиванием вверх. Чашечный отражатель крепится к выходному патрубку сопла тремя стойками.

Восполнение потерь воды в СТВ производится из трубопровода, подающего воду на Гомельский химзавод насосами станции II-го подъема РУП «Водоканал» из реки Сож. Изменение подачи насосов осуществляется варьированием количества одновременно включенных циркуляционных насосов.

Проблемы эксплуатации оросительных и водораспределительных систем башенных градирен

Находящиеся в эксплуатации СТВ, по опыту выполненных испытаний и обследований, не в полной мере отвечают экономической и надежной работе основного оборудования. К конструктивным недостаткам типовых проектов, отрицательно влияющих на надежность градирен и их охлаждающую эффективность, следует отнести:

- недостаточную охлаждающую способность градирен с асбоцементным оросителем относительно нормативной характеристики;
- неравномерность расходов воды по половинам градирен и недостаточные (низкие) напоры воды перед разбрызгивающими соплами, что негативно сказывается на охлаждающей эффективности градирен (напор ниже допустимого значения 1,2 м);
- неудачную конструкцию воздухорегулирующих устройств или их отсутствие при больших высотах воздухоходного окна, в результате чего при отрицательных температурах воздуха происходит интенсивное обмерзание и разрушение оросителя и конструкций градирен;
- большой зазор между оросителем и оболочкой вытяжной башни, наличие в оросителе незаполненных участков, что обеспечивает неорганизованный проход воздуха, ухудшающий охлаждающую эффективность, а в зимнее время вызывающий обледенение конструкций;
- неравномерную гидравлическую нагрузку оросителя, особенно в периферийной зоне, создающую благоприятные условия для ледообразования на оросителе;
- использование в системах водораспределения отражательных сопел, часто ломающихся и забивающихся, кроме того, сопла требуют высокой точности вертикальной установки, что трудно достижимо;
- несовершенную конструкцию разбрызгивающих сопел;
- ненадежную конструкцию опорной сетки оросителя;
- отсутствие автоматизированных систем управления процессами распределения потоков воды и работой градирен в зависимости от эксплуатационных режимов и метеорологических условий.

В процессе длительного срока эксплуатации, физического и морального износа оборудования и конструкций градирен имеют место повреждения листов, наклон блоков, обрушение блоков оросителей, разрушение антикоррозионной защиты и коррозия стальных опор и трубопроводов, происходит ухудшение гидравлических характеристик, снижается охлаждающая эффективность.

Решение задачи

Как уже было сказано, башенные градирни Гомельской ТЭЦ-2 оборудованы оросителями из плоских асбестоцементных листов и водоразбрызгивающими соплами ударного типа с перфорированным чашечным отра-

жателем с разбрызгиванием вверх. Асбестоцементный ороситель даже при его удовлетворительном состоянии и охлаждающей эффективности градирен, близкой к нормативной СТБ, не может обеспечить конденсационной мощности трех энергоблоков электростанции в летний период. Поэтому для обеспечения конденсационной мощности трех энергоблоков в летний период и улучшения технико-экономических показателей станции необходима замена существующих асбестоцементных оросителей градирен на современные, обладающие большей охлаждающей способностью.

Тепломассообменное устройство (ТМУ) градирни отвечает за охлаждение воды, в нем происходит до 90 % всего теплосъема и охлаждения технологической воды. От эффективности и надежности работы ТМУ зависит эффективность и надежность работы всего оборудования предприятия.

Основное назначение ТМУ – создание развернутой поверхности воды и условий для беспрепятственной подачи воздуха к этой поверхности. Наибольшее распространение получили ТМУ, изготавливаемые:

- из натуральных материалов – асбошифер, древесина;
- из искусственных – пластические массы (полиэтилены низкого и высокого давления, полипропилены, поливинилхлорид и др.).

Качественные характеристики ТМУ зависят от:

- материала изготовления;
- конструкции сборочных элементов и блоков ТМУ;
- способа изготовления.

В зависимости от способа охлаждения воды в результате контакта с воздухом различают три типа оросителей:

1. Пленочные ТМУ (асбоцементные, деревянные).

Охлаждение происходит в результате контакта воздуха с водяной пленкой, образующейся на элементах при обтекании их падающей сверху водой. Применялись до 1990-х гг.

2. Капельно-пленочные ТМУ (из полимерных листов и трубок).

Охлаждение происходит в результате контакта воздуха с водяной пленкой, крупными и мелкими каплями. Низкая эффективность теплосъема вследствие кратковременного образования пленки и малой степени дробления капель.

3. Капельные ТМУ (оросители решетчатой структуры).

Самые эффективные оросители, так как теплосъем с капель гораздо выше, чем с пленки. Структура и величина поверхности охлаждения, образующейся при раздроблении воды в решетнике, активная поверхность охлаждения определяются свободной поверхностью капель, падающих с одних элементов на другие. Капли воды, попадающие на элементы, ударяются об них, дробятся, образуя новые капельные структуры с новой поверхностью контакта с воздухом. При этом многоярусный ороситель одновременно уменьшает среднюю скорость падения капель и перемешивание воды по пути ее движения.

В последнее время в отечественной и мировой практике градирнестроения широкое применение нашли оросители из полимерных материалов.

Современные полимерные оросители (при относительно малой их высоте) по своей охлаждающей эффективности значительно лучше асбоцементных (рис. 2) и деревянных. Полимерные оросители, кроме высокой охлаждающей эффективности, еще характеризуются простотой монтажа, долговечны и надежны в эксплуатации и намного легче по весу (более чем в десять раз асбоцементного).

Расчеты по определению располагаемой конденсационной мощности ТЭЦ после реконструкции градирен показали, что для обеспечения конденсационной мощности ТЭЦ в летний период (работа трех энергоблоков, в том числе один – с теплофикационным отбором или два – с конденсационным) необходимо повышение охлаждающей эффективности градирен примерно на 4 °С по сравнению с фактической охлаждающей способностью градирен. Достичь соответствующей охлаждающей эффективности градирни возможно при установке современного полимерного решетчатого или пленочного оросителя. Высота установки оросителя составляет 0,9 м. Увеличение высоты оросителя до 1,2 м и далее нецелесообразно по причине относительно малого снижения температуры воды (менее 1 °С) при повышении объема оросителя на 30 %.

В качестве такого оросителя на Гомельской ТЭЦ-2 используется высокоэффективный полипропиленовый решетчатый ороситель типа NC20 (рис. 3). Этот тип оросителя обеспечивает высокую охлаждающую способность градирни, его блоки имеют высокую пространственную (объемную) жесткость и стойкость к внешним нагрузкам (воздействиям) (потoki воды, перемещение персонала при ремонте и обслуживании градирни и т. д.) на них. Конструкция блоков оросителя обеспечивает их обработку, за счет чего достигнута плотная укладка оросителя по периферии градирни, а также вокруг колонн и центрального стояка.

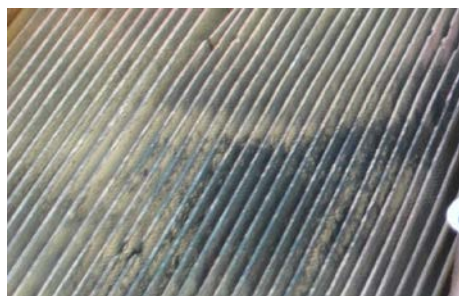


Рис. 2. Асбоцементный ороситель

Fig. 2. Asbestos sprinkler



Рис. 3. Решетчатый ороситель типа NC20

Fig. 3. Lattice sprinkler of the NC20 type

ТМУ на основе полипропилена типа NC20 превосходит другие типы оросителей:

- по технологическим характеристикам – имеет наименьшее значение коэффициента аэродинамического сопротивления, включая и сопротивление стекающей воды;

- по значению объемного коэффициента массообмена;
- по физико-химическим и прочностным характеристикам;
- обеспечивает большую глубину охлаждения по сравнению с нормативными показателями.

Глубокое охлаждение воды в ТМУ на основе полипропилена типа NC20 при относительно небольшой высоте достигается за счет многократного дробления капель воды и частоты смены поверхности их охлаждения. ТМУ на основе полипропилена типа NC20, кроме Гомельской ТЭЦ-2, успешно эксплуатируется на градирнях Дарницкой ТЭЦ, Зуевской ГРЭС, Харьковской ТЭЦ-5 (Украина) и многих других объектах энергетики Европы и мира.

Одним из условий эффективной и надежной работы градирни является равномерное распределение воды над оросителем. Это обеспечивает правильное расположение системы лотков и труб, а также применение эффективных разбрызгивающих сопел.

Эффективность технологических процессов, реализуемых при распыливании жидкой фазы, в значительной мере зависит от правильного выбора распыливающего устройства. При выборе распыливающего устройства к нему предъявляют требования, которые можно разделить на две группы: конструкция устройства и характеристика распыла. Первая группа требований касается, прежде всего, способа распыливания и надежности работы. Это определяет выбор материала или ограничивает размер проходных отверстий, что очень важно при распыливании жидкостей и сред, содержащих механические включения.

Водораспределительные устройства градирен можно разделить на три основные группы: разбрызгивающие, без разбрызгивания и подвижные (рис. 4). Разбрызгивающие водораспределительные устройства, в свою очередь, подразделяются на безнапорные, представляющие собой системы открытых желобов и лотков, и напорные, выполняемые из закрытых желобов или труб с соплами или разбрызгивателями, к которым вода подводится с большим или меньшим напором.

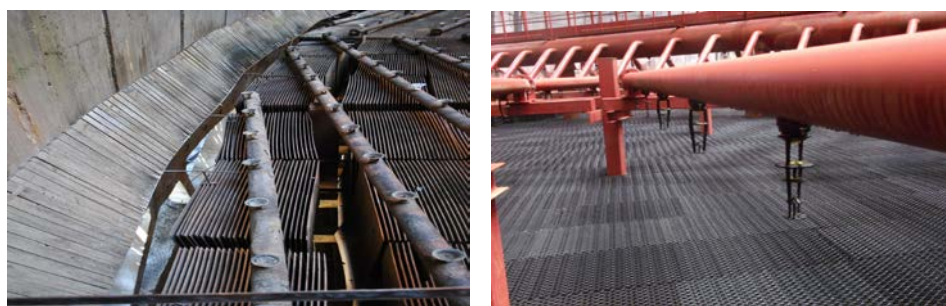


Рис. 4. Оросительное и водораспределительное устройства старой и новой конструкций

Fig. 4. Irrigation and water distribution device of the old and new designs

Современные водоразбрызгивающие сопла выполняются из пластмасс: полиэтилена, полистирола. Основные виды сопел, применяемых в градирнях, представлены на рис. 5.



Рис. 5. Сопла, применяемые в градирнях (по данным ЗАО СП «Бротеп-ЭКО»)

Fig. 5. Nozzles used in cooling towers (according CJSC JV "Brotep-EKO")

Исследовательские работы по водораспределительным системам градирен выполнялись АОО «НИИ ВОДГЕО» на протяжении более 30 лет. Эти работы обеспечили широкое внедрение пластмассовых сопел в типовых и индивидуальных проектах градирен с последующим их крупномасштабным строительством в СССР, СНГ и во многих других странах [10, 11].

При реконструкции градирни № 1 на Гомельской ТЭЦ-2 применены наиболее эффективные водоразбрызгивающие сопла типа «U» (рис. 6). Основные преимущества таких сопел:

- изготовлены из полипропилена, стабилизированного от влияния ультрафиолетового излучения, обладают высокой надежностью и долговечностью;
- имеют нижнее водораспределение, что исключает образование донных отложений в рабочих трубопроводах системы водораспределения, а также обеспечивают автоматический дренаж (опорожнение) рабочих трубопроводов, предотвращающий замерзание в зимних условиях;
- позволяют просто и быстро изменять диаметр выходного отверстия без замены сопел за счет смены сопловых вставок различного диаметра;
- обеспечивают эффективное и равномерное распыление воды.

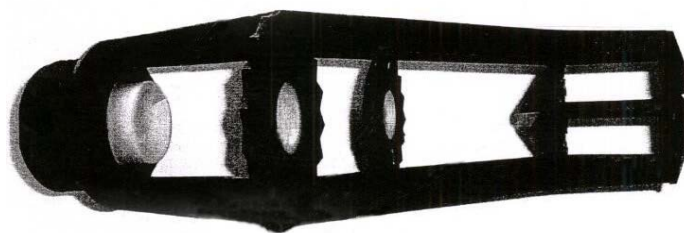


Рис. 6. Сопло типа «U»

Fig. 6. The nozzle of the "U" type

Использование низконапорных водоразбрызгивающих сопел с разбрызгиванием вниз позволяет при низких напорах воды перед ними обеспечить необходимую площадь орошения и эффективность разбрызгивания. Применение водоразбрызгивающих сопел с диаметрами выходного отверстия 20 и 22 мм (и другими) выравнивает аэродинамическое сопротивление между центральной и периферийной частями охлаждающего устройства.

Работа градирни с соплами старой (ударного типа с перфорированным чашечным отражателем из полиэтилена с разбрызгиванием вверх) и новой конструкций (низконапорные, эффективные, из полипропилена, с разбрызгиванием вниз) представлена на рис. 7.



Рис. 7. Работа градирни с соплами старой и новой конструкций

Fig. 7. Work of the cooling tower with the nozzles of the old and new designs

Необходимо отметить, что часто при выборе оросителей и сопел для модернизации или выполнения проекта нового строительства градирен не принимаются во внимание их физико-химические свойства, способы изготовления и практические результаты использования. Например, конструкции из ПВХ, кроме низкой механической прочности, являются благоприятной средой для роста водорослей. Разрушения данного типа оросителя зафиксированы в начальный период эксплуатации на ряде электростанций – Ново-Зиминской ТЭЦ, Каргалинской ТЭЦ, ТЭЦ «Байконурэнерго». Причем независимо от страны-изготовителя [12].

Система зимнего обогрева

Основными особенностями работы градирен Гомельской ТЭЦ-2 в зимнее время являются:

- значительные изменения тепловых нагрузок на градирни (снижение нагрузок в ночное время и выходные дни с переходом работы блоков в режим теплового графика для соблюдения заданного диспетчерского графика выработки электрической мощности энергоблоками);
- в периферийной части градирен система водораспределения выполнена таким образом, что от крайних сопел капли воды попадают на внутреннюю поверхность оболочки, и вода по оболочке стекает вниз и попадает на опорную наклонную колоннаду вытяжной башни.

Снижение суммарной электрической нагрузки энергоблоков ТЭС или останов энергоблоков приводит к значительному уменьшению тепловых нагрузок на градирню. При отрицательных температурах наружного воздуха естественная тяга воздуха в градирне повышается, что приводит к снижению температуры охлажденной воды в градирне. При одновременном снижении температуры наружного воздуха и уменьшении тепловой нагрузки на градирню происходит более интенсивное снижение температуры охлажденной воды. Снижение температуры охлажденной воды в градирне приводит к обледенению градирни. Интенсивному обледенению наиболее подвержена периферийная часть градирни, кроме того, появляется опасность образования шуги в циркуляционной воде.

Наиболее эффективным методом предотвращения обледенения и регулирования температуры охлажденной воды после градирни является комбинированный метод – одновременное создание водяной завесы и установка на воздухоходных окнах градирни поворотных или съемных щитов. Поворотные щиты обеспечивают возможность в широком диапазоне регулировать расход воздуха, поступающего в градирню, и даже при малых тепловых нагрузках и низких температурах наружного воздуха поддерживать температуру охлажденной воды в требуемом диапазоне. Создание водяной завесы при комбинированном методе исключает обмерзание технологических и конструктивных элементов по периферии градирни от потоков холодного воздуха, который прорывается через зазоры в щитах.

Водяная завеса создает дополнительное сопротивление на входе воздуха в подоросительное пространство градирни, снижает тягу и уменьшает

расход воды через ороситель градирни примерно на 30 %. Это приводит к ухудшению охлаждающей способности градирни и повышению температуры охлажденной воды в градирне, что препятствует обмерзанию периферийной части градирни. Ориентировочное повышение температуры воды в градирне может составлять 3–4 °С.

При реконструкции градирни № 1 Гомельской ТЭЦ-2 произведена прокладка по периметру градирни на уровне верха входного окна трубопровода противообледенительной водяной завесы (рис. 8) диаметром 500 мм, пропускной способностью до 30 % от номинального расхода, равного 22000 м³/ч, с щелевыми отверстиями с определенным шагом. Из-за особенностей схемы подключения сливных трубопроводов после конденсаторов турбин к магистральным сливным циркуловодам (так как слив воды после конденсатора турбины № 1 осуществляется в сливной циркуловод № 1, а после конденсаторов турбин № 2 и 3 – в сливной циркуловод № 2) происходит неравномерное распределение расходов воды между градирнями, а также между половинами каждой из градирен.

Для уменьшения неравномерности распределения потоков воды между охладителями и сливными магистральными циркуловодами была установлена дополнительная перемычка Ду 1600 (рис. 9), так как проектная перемычка, установленная в конце временного торца машинного зала, не обеспечивала выравнивание расходов по циркуловодам.



Рис. 8. Противообледенительная завеса
Fig. 8. The anti-icing veil



Рис. 9. Перемычка между циркуловодами
Fig. 9. The jumper between circulating water pipelines

ВЫВОДЫ

1. Модернизация оросительных и водораспределительных систем градирен с применением современных полимерных материалов является одним из самых эффективных способов улучшения работы систем технического водоснабжения тепловых электростанций и их технико-экономических показателей. Установка новой оросительной и водораспределительной системы позволит улучшить работоспособность, увеличить эффективность и срок эксплуатации градирни. При этом обеспечивается улучшение ее охлаждающей способности на 4,0–4,5 °С в сравнении с типовыми решениями.

2. Улучшение охлаждающей способности градирни достигается за счет применения высокоэффективного полипропиленового решетчатого оросителя типа NC20. Такой ороситель обеспечивает высокую охлаждающую способность градирни, его блоки имеют высокую объемную жесткость и устойчивы к воздействию внешних нагрузок на них (потоки воды, перемещение персонала при ремонте и обслуживании градирни и др.). Конструкция блоков оросителя обеспечивает их обработку, за счет чего достигнута плотная укладка оросителя по периферии градирни, а также около колонн и центрального стояка, что позитивно влияет на эффективность градирни.

3. Установка новой системы водораспределения обеспечит маневренность градирни с различными гидравлическими нагрузками. Применение низконапорных водоразбрызгивающих сопел с разбрызгиванием вниз позволит при низких напорах воды перед ними обеспечить необходимую площадь орошения и эффективность разбрызгивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калатузов, В. А. Влияние технического водоснабжения с градирнями на технико-экономические показатели тепловых электростанций / В. А. Калатузов // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 6 (62). С. 12–16.
2. Калатузов, В. А. Основы технического перевооружения тепловых и атомных электростанций / В. А. Калатузов // Академия энергетики. 2009. № 4 (30). С. 92–95.
3. Мошкарин, А. В. Современные основы технического перевооружения систем технического водоснабжения тепловых электростанций / А. В. Мошкарин, В. А. Калатузов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. Вып. 2. С. 1–5.
4. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Создание и эффективность автоматической системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ. Ч. 1 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, А. Ю. Наумов, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 3. С. 76–84.
5. Доброго, К. В. Моделирование и оптимизация башенных испарительных градирен / К. В. Доброго, М. М. Хеммасиян Кашани // Энергетическая безопасность Союзного государства: сб. материалов секции, 6–11 окт. 2014 г. Минск: БНТУ, 2014. С. 10–14.
6. Доброго, К. В. Моделирование башенной испарительной градирни и влияние аэродинамических элементов на ее работу в условиях ветра / К. В. Доброго, М. М. Хеммасиян Кашани, Е. Е. Ласко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 6. С. 47–60.
7. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев. М.: Энергоатомиздат, 1998. 376 с.
8. Кучеренко, Д. И. Обратное водоснабжение / Д. И. Кучеренко, В. А. Гладков. М.: Стройиздат, 1980. 168 с.
9. Методические указания по наладке систем технического водоснабжения тепловых электростанций: РД 34.22.401–95. М.: СПО ОРГРЭС, 1988. 56 с.
10. Лаптев, А. Г. Устройство и расчет промышленных градирен / А. Г. Лаптев, И. А. Ведьгаева. Казань: КГЭУ, 2004. 180 с.
11. Технический отчет по работе «Испытания и наладка системы технического водоснабжения Гомельской ТЭЦ-2», № 6/63, ЗАО «Техэнерго». Львов, 2006.

12. Калатuzов, В. А. Совершенствование систем технического водоснабжения с целью снижения ограничений мощности ТЭС / В. А. Калатuzов // Промышленная энергетика. 2010. № 2. С. 2–9.

Поступила 02.11.2015 Подписана в печать 05.01.2016 Опубликовано онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Kalatuzov V. A. (2009) The Influence of Technical Water Supply with Cooling Towers on the Technical and Economic Indicators of Steam Power Plants. *Energobezopasnost' i Vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment], 62 (6), 12–16 (in Russian).
2. Kalatuzov V. A. (2009) Fundamentals of Technical Re-Equipment of Steam and Nuclear Power Plants. *Akademiya Energetiki* [Academy of Power Engineering], 30 (4), 92–95 (in Russian).
3. Moshkarin A. V., Kalatuzov V. A. (2008) Modern Fundamentals of Technical Re-Equipment of Technical Water Supply Systems of Steam Power Plants. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State of Power Engineering University], (2), 1–5 (in Russian).
4. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A., Naumov A. Yu., Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy A. Yu. (2015) The Establishment and Efficiency of the Automatic System of Ball Cleaning of the 180-MCC-1 Condenser of the T-180/210-130-1 LMZ Turbine. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obshchestvennykh Nauchnykh Uchebnykh Zavedenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (3), 76–84 (in Russian).
5. Dobrego K. V., Hemmasian Kashani M. M. (2014) Simulation and Optimization of Chimney-Type Cooling Towers. *Energeticheskaya Bezopasnost' Soiuznogo Gosudarstva: Sbornik Materialov Sektsii, 6–11 okt. 2014 g.* [Power Engineering Security of the Union State: Proceedings of the Section, Oct. 6–11, 2014]. Minsk: BNTU, 10–14 (in Russian).
6. Dobrego K. V., Hemmasian Kashani M. M., Lasko Ye. Ye. (2014) Modeling of Chimney-Type Cooling Tower and the Influence of its Aerodynamic Elements on its Work Under the Influence of Wind. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obshchestvennykh Nauchnykh Uchebnykh Zavedenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (6), 47–60 (in Russian).
7. Ponomarenko V. S., Arefiev Yu. I. (1998) *Cooling Towers of Industrial and Energy Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat. 376 (in Russian).
8. Kucherenko D. I., Gladkov V. A. (1980) *Circulating Water Supply*. Moscow, Stroyizdat. 168 (in Russian).
9. Guidance Document 34.22.401–95 (1998). Methodical Instructions on Adjustment of Systems of Technical Water Supply of Steam Power Plants. Moscow: SPO ORGRES. 56 (in Russian).
10. Laptev A. G., Vedgaeyeva I. A. (2004) *Design and Calculation of Industrial Cooling Towers*. Kazan: KSPU. 180 (in Russian).
11. Technical report for the Work “Testing and Debugging of System of Technical Water Supply of Gomel CHP-2”, № 6/63 (2006). Lvov, “Tehenergo” CJSC (in Russian, Unpublished).
12. Kalatuzov V. A. (2010) Improvement of Systems of Technical Water Supply to Reduce Power Limits of Steam Power Plants. *Promyshlennaya Energetika* [Industrial Power Engineering], (2), 2–9 (in Russian).

Received: 02.11.2015

Accepted: 05.01.2016

Published online: 03.06.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-249–259

УДК 621.182

Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности

П. М. Гламаздин¹⁾, Д. П. Гламаздин¹⁾, Ю. П. Ярмольчик²⁾

¹⁾Киевский национальный университет строительства и архитектуры
(Киев, Республика Украина),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Для котлов серий ПТВМ и КВГМ характерны высокие значения выбросов NO_x и CO в продуктах сгорания. Снижение содержания NO_x и CO возможно двумя путями: устройством на выходе из котлов конденсационных теплоутилизаторов и совершенствованием процессов тепломассопереноса в топках котлов. Применение теплоутилизаторов порождает проблемы с загрязнением образующегося конденсата слабо концентрированными кислотами. Авторы провели исследования с целью выяснения эффективности примененных ранее методов подавления выбросов оксидов азота на указанных типах котлов. На всех модернизированных объектах использовался прием выравнивания температурного поля и соответственно интенсификации теплообмена в топке путем замены горелок на более совершенные, конструкция которых позволяет снижать эмиссию оксидов азота. Проведенные исследования показали, что снижение уровня эмиссии NO_x в водогрейных котлах большой мощности вполне возможно путем их модернизации. Разработан проект модернизации котла ПТВМ-30, который реализован в крупной котельной в г. Винница (Украина). Проект включал несколько технических решений. Шесть горелок заменены на две, расположенные в поду, также демонтирован подовый экран. При этом уменьшение общей площади поверхностей нагрева за счет исключения подового экрана компенсировалось за счет заполнения мест расположения шести амбразур штатных горелок на боковых экранах выпрямленными экранными трубами. Установка горелок отдельно от экранов позволила исключить передачу вибрации на экранные трубы и через них на обмуровку котла. Автоматика предусматривала «связанное регулирование». Тягодутьевые машины оснащены частотными регуляторами. Во время пусконаладочных работ на котле проведены исследования, связанные с выявлением зависимости уровня эмиссии от формы температурного поля в топке, в частности от интенсивности крутки газозооной смеси на выходе из горелок. Исследованы два крайних случая – при максимально достижимой на горелке крутке 45° и без крутки. В результате экспериментов отмечено, что при уменьшении крутки уровень эмиссии оксидов азота снижается. Определены методы дальнейшего снижения выбросов оксидов азота: устройство системы рециркуляции дымовых газов путем их подмешивания в дутьевой воздух; ведение процесса при пониженных избытках воздуха с контролируемым химическим

Адрес для переписки

Гламаздин Павел Михайлович
Киевский национальный университет
строительства и архитектуры
просп. Воздухофлотский, 31,
03680, г. Киев-037, Республика Украина
Тел.: +380 44 241-55-80
knuba@knuba.edu.ua

Address for correspondence

Glamazdin Pavel M.
Kiev National University
of Construction and Architecture
31 Povitroflotsky Ave.,
03680, Kiev-037, Republic of Ukraine
Tel.: +380 44 241-55-80
knuba@knuba.edu.ua

недожогом, когда полное окисление углерода до CO_2 заканчивается вне топки на начальном участке конвективной части; увлажнение дутьевого воздуха в количестве 1,5–2,0 % от номинальной производительности котла.

Ключевые слова: эмиссия, оксиды азота, топка, горелка, температурное поле, эксперимент, крутка, газозоудушная смесь

Для цитирования: Гламаздин, П. М. Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин, Ю. П. Ярмольчик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 249–259

Environmental Aspects of Modernization of High Power Water-Heating Boilers

P. M. Glamazdin¹, D. P. Glamazdin¹, Yu. P. Yarmolchick²

¹Kiev National University of Construction and Architecture (Kiev, Republic of Ukraine),

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Boilers of KVGM and PTVM series are characterized by high values of NO_x and CO content in the combustion products. Reduction of NO_x and CO content can be achieved by two ways: by installing the condensing heat recovery unit at the boiler outlet and by improving the heat and mass transfer processes in boiler furnaces. Application of the condensing heat recovery units causes pollution of resulting condensate by low-concentration acids. The authors conducted a study in order to determine the effectiveness of the previously applied methods of suppressing the emission of nitrogen oxides in the boilers of these types. Equalization of the temperature field and, consequently, enhancement of heat transfer in the furnace by substitution the used burners by the more advanced ones, the design of which facilitates reduction the emission of nitrogen oxides, were applied to all the upgraded facilities. The studies fulfilled demonstrate that a reduction of NO_x emissions in water-heating high power boilers is fairly possible by means of modernization of the latter. The authors have developed the project of the PTVM-30 boiler modernization, which was implemented at a large boiler plant in the city of Vinnitsa (Ukraine). The project included a number of technical solutions. Six burners were replaced by the two ones that were located in the hearth; also the hearth screen was dismantled. At the same time, reducing the total surface area of the heating caused by the exclusion of hearth screen was compensated by filling the locations of the six embrasures of staff burners on the side screens with straightened furnace tubes. Installing the burners separate from the screen made it possible to eliminate the transfer of vibration to the furnace tubes, and – via them – to the boilers setting. Automation provided “associated regulations”. Draught machines were equipped with frequency regulators. During commissioning of the boiler the studies were carried out that related to the identification of dependency of the emission level on the shape of the temperature field in the furnace, in particular, – on the intensity of twist of gas-air mixture at the exit from the burner. We studied two extreme cases, i.e. the case of the maximum achievable level of burner twist that is equal to 45° and the case of no twist. As a result of experiments, it was observed that if a decrease of the twist rate takes place the emission of nitrogen oxides is reduced. The methods of further reduction of emissions of nitrogen oxides have been determined, viz. the device recirculation of flue gases by mixing them in a blast air; conducting the process at low excess of air with controlled chemical underburning when complete oxidation of carbon to CO_2 accomplishes outside the furnace at the initial section of the convection part; hydration of blowing air into the humidification amount of 1.5–2.0 % of the nominal output of the boiler.

Keywords: emissions, nitrogen oxides, furnace, burner, temperature field, experiment, twist, gas-air mixture

For citation: Glamazdin P. M., Glamazdin D. P., Yarmolchick Yu. P. (2016) Environmental Aspects of Modernization of High Power Water-Heating Boilers. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 249–259 (in Russian)

В Украине и Беларуси, как и в других странах, образовавшихся после распада СССР и Совета экономической взаимопомощи, большая часть районов в городах снабжается теплотой посредством системы централизованного теплоснабжения (СЦТ). Источником теплоты для СЦТ являются либо теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), либо крупные отопительные котельные. И в одном и в другом случае используются мощные водотрубные водогрейные котлы в качестве основных источников теплоты или как пиковые. Котлы применяются в основном двух типов – серий ПТВМ и КВГМ, которые работают на природном газе (резервное топливо – мазут). Во время их проектирования и производства проблемы экологии не стояли так остро, как в настоящее время, поэтому для этих типов котлов характерны высокие значения выбросов NO_x и CO в продуктах сгорания, особенно для котлов типа ПТВМ (NO_x до $350\text{--}400 \text{ мг/м}^3$).

Несмотря на ускорение развития альтернативной энергетики и увеличение доли возобновляемых источников энергии, «Дорожная карта Европейского союза по энергетике до 2050 г.» сохраняет за природным газом не менее 25 % в тепловом балансе ЕС [1]. Исходя из этого в ряде стран принимаются программы по снижению вредных выбросов, в том числе при сжигании горючих газов. Например, в 2015 г. в Украине принята программа повышения экологических характеристик теплогенерирующего оборудования большой мощности [2], что заставляет теплоэнергетические предприятия обратить более серьезное внимание на эту проблему.

Принципиальное снижение содержания NO_x и CO возможно двумя путями: устройством на выходе из котлов конденсационных теплоутилизаторов и совершенствованием процессов тепломассопереноса в топках котлов.

Устройство теплоутилизаторов с конденсацией содержащихся в продуктах сгорания водяных паров разрабатывалось еще в 60–80-е гг. прошлого века [3]. Этот способ принципиально не уменьшает количества вредных соединений, генерируемых в процессе сжигания органических топлив, а только предотвращает их попадание в атмосферный воздух. В результате применение теплоутилизаторов порождает проблемы с загрязнением образующегося конденсата, в котором растворяются оксиды азота, серы и углерода, превращая его в смесь нескольких кислот низкой концентрации [4]. Проблема надежной нейтрализации кислого конденсата при больших его количествах (до 5 т/ч и более) [5] до сих пор не имеет простого и надежного решения.

В СССР проблемой совершенствования тепло- и массообменных процессов с целью уменьшения генерирования в топках котлов оксидов азота и бензопирена занимались несколько исследовательских институтов (ВТИ, ЭНИН, ЦКТИ, ХФЦКБ, ИГАНУССР, СредАЗНИИГАЗ). Результаты их исследований опубликованы в научных статьях и монографиях [6–10]. Обобщая приведенные в этих источниках данные, можно выделить несколько направлений подавления образования оксидов азота в топках котлов:

- рециркуляцию дымовых газов в зону горения;
- ступенчатое и нестехиометрическое сжигание топлива;
- совершенствование конструкции горелок;
- оптимизацию места установки горелок в топке;
- интенсификацию теплообмена в топках;
- комбинированные методы.

Однако большая часть исследований проведена применительно к мощным энергетическим паровым котлам, предназначенным для обеспечения перегретым паром теплосиловых установок, работающих по циклу Ренкина. Условия эксплуатации и, следовательно, конструкция этих котлов значительно отличаются от условий эксплуатации водогрейных котлов. Только одно из исследований в приведенных источниках было посвящено оптимизации расположения горелок в топках водогрейного котла ПТВМ-50 [10].

Исследованиям процессов образования оксидов азота в водогрейных котлах малой и средней мощности посвящены работы [11, 12]. В [11] показано увеличение образования оксидов при повышении нагрузки котлов серий ДКВр и НРч-25, что совпадает с данными, приведенными в [6–10]. В [12] выявлено, что увеличение степени рециркуляции сверх определенного значения приводит к росту недожога, связанного с отсутствием в котлах такого типа конвективных поверхностей нагрева, наличие которых снижает этот отрицательный эффект.

В связи с гораздо более жесткими требованиями к уровню выбросов при сжигании органического топлива проблема снижения вредных выбросов возникла на территории бывшей ГДР при объединении Германии, а затем и в государствах Восточной Европы и Прибалтики по мере их вхождения в Евросоюз. Во всех этих странах эксплуатировались котлы серий ПТВМ и КВГМ большой мощности, где не стали заменять существующие котлы новыми, а модернизировали их, применяя перечисленные выше методы или их комбинации. Авторы провели специальное исследование с целью выяснения эффективности методов подавления выбросов оксидов азота. При этом использовали информацию от производителей горелок, которые устанавливались на котлах вместо штатных горелок ныне не существующей фирмы «Ильмарине» (Таллинн, Эстония), а также полученная авторами непосредственно на отопительных котельных или ТЭЦ, где модернизировались котлы.

В середине 1990-х гг. в городах Росток и Дрезден (ГДР) модернизированы котлы ПТВМ-100 путем замены 16 штатных горелок на шесть горелок большей мощности фирмы SAACKE (Германия), установленных на фронте котла в два яруса. На каждом ярусе использовано по одному дутьевому вентилятору. Кроме того, экраны в топке котла проварены специальными проставками, таким образом они преобразованы в мембранные газоплотные. Башенная компоновка изменена на обычную П-образную с использованием дымососа. В результате этих изменений в конструкции котла была достигнута величина выбросов NO_x менее 150 мг/м^3 , что удовлетво-

ряло тогда европейским нормам. В это же время в г. Шверин (Германия) был модернизирован котел ПТВМ-50 путем замены 12 штатных горелок на две новые горелки производства фирмы RAY (Германия), расположенные также одна под другой на фронте котла. В остальном модернизация была проведена в том же объеме. В конце 1990-х гг. в г. Секешфехервар (Венгрия) на двух котлах ПТВМ-30 заменили шесть штатных горелок на три горелки фирмы Weishaupt (Германия), расположенные в поду топки. Объем модернизации включал также перевод экранов топки в газоплотные мембранные.

При модернизации котлов во всех трех случаях заменена облегченная обмуровка на легкую из волокнистых теплоизоляционных материалов, покрытых сверху металлическим сайдингом, а также использован прием выравнивания температурного поля и соответственно интенсификации теплообмена в топке. Кроме того, конструкция горелок предполагала меньшую эмиссию оксидов азота. Таким образом, везде использована комбинация из двух методов. Более того, двухъярусное расположение горелок в котлах ПТВМ-100 и ПТВМ-50 позволило реализовать двухступенчатое горение.

В начале 2000-х гг. в Софии (Болгария) произведена модернизация котла ПТВМ-100 с увеличением его мощности до 120 Гкал/ч путем увеличения площади топочных экранов и устройства новой конвективной части с переходом от башенной компоновки к П-образной. При этом 16 штатных горелок были заменены на четыре более мощные производства фирмы Oilon (Финляндия). Горелки расположены на противоположных стенках топки по две в двух ярусах. Ярусы находятся на разной высоте, и горелки направлены под углом к поду топки [13]. Таким образом в этом случае реализована комбинация из трех методов подавления NO_x : выравнивание и интенсификация температурного поля в топке; использование горелок с конструкцией, обеспечивающей генерирование меньшего количества NO_x (так называемого эмиссионного класса LowNO_x) и возможность ступенчатого сжигания топлива с пониженными коэффициентами избытка воздуха.

В середине 2000-х гг. в соответствии с ужесточением европейских норм на котлах ПТВМ-100 и ПТВМ-50 произведена дополнительная реконструкция, заключавшаяся в организации рециркуляции дымовых газов в топку котла. В результате эмиссия NO_x в этих котлах снижена до уровня новых норм – меньше 100 мг/м^3 . В данный период реконструирован третий котел ПТВМ-30 в г. Секешфехервар (Венгрия). В поду котла установлена одна горелка фирмы SAACKE (Германия), которая обеспечивала пониженные выбросы NO_x . Топочные экраны также преобразованы в газоплотные.

Во всех случаях полностью заменялась газовая арматура под европейский стандарт EN 676 [14] и система автоматического управления горелками по алгоритму так называемого «связанного регулирования».

В 2000-е гг. страны Прибалтики, в которых кроме котлов серии ПТВМ используются также котлы более поздней серии КВГМ, имеющей другую компоновку, также начали реализовывать программы модернизации ко-

тельного оборудования. Для котлов серии ПТВМ здесь применяли самые простые методы – замену некоторых горелок на новые или вовсе модернизацию горелок в части установки устройств автоматического розжига и новых приборов контроля наличия пламени. Именно так преобразован один из котлов ПТВМ-100 в г. Таллине (Эстония), где все 16 горелок были оставлены на месте. Рядом, в той же котельной, работает такой же котел, но на нем вместо штатных горелок установлены четыре горелки фирмы Hamworthy (Великобритания) – на каждой из двух противоположных стенок топки по две горелки на разных уровнях под углом вниз.

В г. Алитус (Литва) произведена модернизация котла ПТВМ-50 путем замены всего четырех штатных горелок на новые горелки фирмы Pillard (Франция), расположенные по две с двух сторон на верхнем ярусе. Во всех случаях в обязательном порядке менялось газовое оборудование под стандарт EN 676 и устанавливалась новая система автоматического управления.

Примеры прямой замены горелок имеются в Российской Федерации – в Санкт-Петербурге произведена модернизация котла ПТВМ-30 путем замены шести штатных горелок на шесть горелок фирмы RAY (Германия) [15].

Котлы серии КВГМ имеют меньшее число штатных горелок: от одной – для котлов мощностью до 30 Гкал/ч включительно; до трех – для котлов КВГМ-100. Их модернизация производится в основном путем прямой замены горелок, количество которых либо остается прежним (при использовании горелок фирмы SAACKE), либо увеличивается (например, для котла КВГМ-10 в Латвии использовали две горелки фирмы ELKO (Германия) вместо одной штатной, а на ТЭЦ-2 в Риге на котле КВГМ-100 установлены четыре горелки фирмы TODD (США) вместо трех штатных, что связано со слишком большими длинами факелов горелок большой мощности, необходимых для прямой замены) [16].

В этих случаях для удовлетворения требований по эмиссии NO_x использовались горелки в специальном исполнении Low NO_x , которые имеются в перечне продукции всех ведущих производителей.

Проведенные исследования показали, что снижение уровня эмиссии NO_x в водогрейных котлах большой мощности вполне возможно путем их модернизации. Последняя не обязательно должна заключаться в замене горелок на новейшие и очень дорогие горелки с пониженной эмиссией NO_x . Предпочтительно осуществлять комплексный подход, т. е. применить несколько методов одновременно, что позволит использовать менее дорогие горелки и снизить общие расходы на модернизацию.

Авторами разработан проект модернизации котла ПТВМ-30, который реализован в крупной котельной в г. Виннице (Украина). Проект включал несколько технических решений. Шесть горелок заменены на две, расположенные в подду. В отличие от проектов, реализованных в г. Секешфехервар (Венгрия), горелки не крепили к трубной части, а устанавливали на специальном постаменте, из-за чего пришлось вовсе убрать подовый экран и по-новому обвязать нижние коллекторы вертикальных топочных экранов. При этом уменьшение общей площади поверхностей нагрева за счет исключения подового экрана компенсировалось заполнением мест распо-

ложения шести амбразур штатных горелок на боковых экранах выпрямленными экранными трубами. Установка горелок отдельно от экранов позволила исключить передачу вибрации на экранные трубы и через них на обмуровку котла. Газовая аппаратура скомпонована согласно стандарту Европейского союза EN 676, автоматика предусматривала «связанное регулирование». Тягодутьевые машины не заменялись, но были дооснащены частотными регуляторами. Целью проекта, осуществленного в 2011 г., была полная автоматизация работы котла и повышение его КПД [17]. Экологические характеристики не ограничивались тогда так строго, как требует новый нормативный документ [2]. Приемлемым уровнем была определена концентрация NO_x не выше 250 мг/м^3 , до модернизации уровень эмиссии NO_x от котла достигал 360 мг/м^3 при коэффициенте избытке воздуха $\alpha \approx 1,25$, а температура уходящих газов составляла 190°C .

Во время пусконаладочных работ на котле проведены некоторые исследования, связанные с выявлением зависимости уровня эмиссии от формы температурного поля в топке, в частности от интенсивности крутки газозвоздушной смеси на выходе из горелок. Согласно [18], крутка показывает изменение момента количества движения газозвоздушной смеси на выходе из устья горелки, т. е. это мера закрученности потока. Исследованы два крайних случая: при максимально достижимой на горелке крутке 45° (максимальный угол наклона лопаток в установленной горелке) и без крутки (при 0° горелка становится прямоточной). И в том и в другом случае недожог практически отсутствовал (концентрация CO в дымовых газах была в пределах 10 ppm). Для измерения состава продуктов сгорания использовался газоанализатор Testo 300 (Германия). В результате экспериментов отмечено, что эмиссия NO_x в исследованных случаях угла крутки происходила совершенно по-разному. Как и в исследованиях [6–10], с повышением нагрузки эмиссия NO_x возрастала. Однако скорости этого роста значительно отличались (рис. 1).

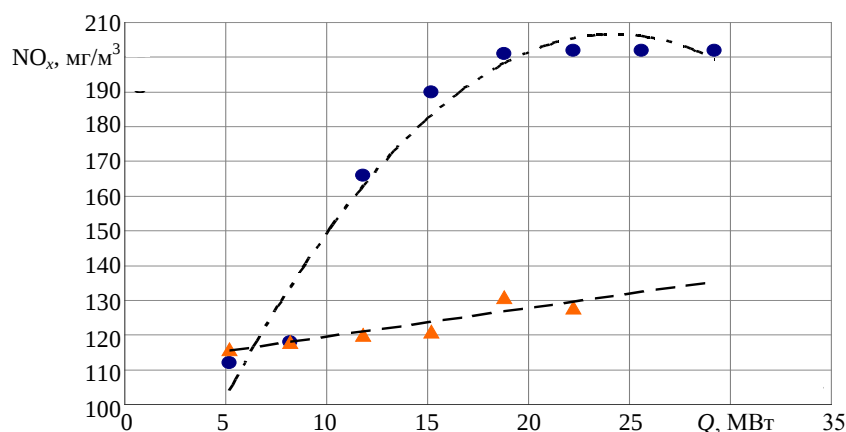


Рис. 1. Зависимость концентрации оксидов азота от мощности при различных крутках:

● – 45° ; ▲ – 0

Fig. 1. The nitrogen oxides concentration vs boiler power at different twists:

● – 45° ; ▲ – 0

Слишком большая крутка приводит к образованию в нижней части топки зоны с повышенной температурой, в которой активно генерируются оксиды азота. Превышение эмиссии оксидов азота по сравнению с прямоточным режимом составляет более 50 %. Реализовать режимы с большей нагрузкой, чем показано на рисунке, без крутки на прямоточном режиме работы горелки не удалось из-за опасения, что факел начнет достигать фестона. Однако и так стало очевидно, что при уменьшении крутки эмиссия оксидов азота снижается. Реконструированный котел находился в эксплуатируемой котельной, и проводить дальнейшие натурные эксперименты не представлялось возможным. Крутка была уменьшена наполовину, и в результате максимальная концентрация NO_x на выходе составила 175 мг/м^3 , что вполне удовлетворило заказчика. Нужно отметить, что согласно паспортным данным минимальная эмиссия NO_x для использованных горелок SG-150 фирмы SAACKE в обычном исполнении гарантируется в пределах 200 мг/м^3 . Это свидетельствует о том, что уровень выбросов от котла зависит не только от конструкции горелки, но и от оптимального для данной топки их расположения. В результате реконструкции получены и другие положительные эффекты. Значительно расширен диапазон нагрузок со стороны уменьшения. Поскольку горелки включены в каскаде, минимальная нагрузка котла при работе одной горелки составляет 2,5 МВт, что соответствует ночной нагрузке на горячее водоснабжение в летнее время, когда разбор воды практически отсутствует и система работает в режиме циркуляции. Котел работает полностью в автоматическом режиме либо реализуя погодное регулирование, либо регулирование по температуре теплоносителя на выходе из котла по командам, задаваемым диспетчером. Достигнута экономия электроэнергии на привод тягодутьевых машин в пределах 30 %. КПД котла – 92,5–94 % на всех режимах. Пуск котла осуществляется одним нажатием кнопки. При малых нагрузках летом, когда котел работает один на трубу высотой 100 м, рассчитанную на работу трех котлов, дымосос автоматически отключается и разрежение в топке поддерживается шибером с сервоприводом.

Компьютерное моделирование температурного поля в топке котла, проведенное авторами [19], подтвердило, что при различной нагрузке крутка должна быть разной, чего можно добиться, изменив конструкцию горелок. Изменение крутки в соответствии с изменением нагрузки позволит выровнять тепловое напряжение в топке по площади Q_F на различной высоте и сгладить за счет этого рост эмиссии NO_x с ростом нагрузки. Вертикальное расположение факела снизу-вверх способствует выравниванию Q_F . Коэффициент заполнения топки факелом при этом приближается к единице. Попытки создания подобных горелок производились и ранее. Предлагалось, например, использовать горелки ВНИИМГ-Д мощностью до 22,5 МВт с регулируемой длиной факела и очень широким диапазоном регулирования [20].

С выходом новых, более жестких требований к наличию NO_x в уходящих газах авторы проекта столкнулись с необходимостью повторно модернизировать котел. Аналогичная ситуация возникла на ТЭЦ в Ростове и Дрездене (Германия) в 2005 г. Собственно, и пути решения проблемы

аналогичны. Для дальнейшего уменьшения выбросов без замены горелок можно использовать разные методы или их комбинации. Простейший метод – устройство системы рециркуляции дымовых газов путем их подмешивания в дутьевой воздух. Дорогобужский котельный завод даже анонсировал выпуск специальной горелки, рассчитанной на использование рециркуляции дымовых газов [21]. При необходимости еще более глубокого снижения NO_x можно использовать ведение процесса при пониженных избытках воздуха с контролируемым химическим недожогом, когда полное окисление углерода до CO_2 заканчивается уже вне топки на начальном участке конвективной части [22]. Наконец, можно еще больше снизить выбросы NO_x путем увлажнения дутьевого воздуха в количестве 1,5–2,0 % от номинальной производительности котла [23].

ВЫВОД

Неизбежное ужесточение требований к экологическим характеристикам водогрейных и паровых котлов в системе централизованного теплоснабжения не обязательно должно вести к их замене. Имеется ряд способов снижения вредных выбросов в атмосферу, основанных на положительных результатах экспериментальных исследований и опробованных в условиях эксплуатации. При выборе набора методов предварительно необходимо произвести численное исследование температурного поля в топке котла, подлежащего реконструкции, с целью определения количества и места расположения горелок. При необходимости замены горелок не обязательно использовать самые дорогие горелки типа LowNO_x 3-го эмиссионного класса [24]. Можно обойтись более простыми и дешевыми горелками, а глубокого подавления эмиссии оксидов азота достичь, используя другие, менее затратные способы, включая методы режимной наладки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гелетуха, Г. Г. Аналіз основних положень дорожньої карти ЄС з енергетики до 2050 року / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железка, А. І. Дроздова // Промислова теплотехніка. 2012. Т. 34, № 5. С. 64–69.
2. Національний план скорочення викидів від великих опалювальних установок (Кінцевий Проект) [Електронний ресурс]. 2015. Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>. Дата доступу: 23.01.2016.
3. Прима, А. В. Методы и аппараты снижения выбросов азота в энергоустановках / А. В. Прима, А. И. Сигал. Киев: Наук. думка, 1989. 44 с.
4. Жуков, Е. Теплообменники конденсационных котлов / Е. Жуков // Аква-Терм. 2013. № 2. С. 10–13.
5. Седлов, А.С. Получение конденсата из уходящих дымовых газов на экспериментальной установке ОАО ГРЭС-24 / А. С. Седлов, А. П. Солодов, Д. Ю. Бухонов // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. № 5. С. 76–77.
6. Найденов, Г. Ф. Горелочные устройства и защита атмосферы от оксидов азота / Г. Ф. Найденов. Киев: Техніка, 1979. 96 с.
7. Внуков, А. К. Надежность и экономичность котлов для газа и мазута / А. К. Внуков. М.; Л.: Энергия, 1966. 368 с.
8. Найденов, Г. Ф. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках / Г. Ф. Найденов. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
9. Павлов, В. А. Условия оптимизации процессов сжигания жидкого топлива и газа в энергетических и промышленных установках / В. А. Павлов, И. Н. Штейнер. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 120 с.

10. Кривоногов, Б. М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды / Б. М. Кривоногов. Л.: Недра, 1986. 280 с.
11. Шматов, Е. П. Исследования влияния рециркуляции продуктов сгорания природного газа в топку котла на его теплотехнические характеристики / Е. П. Шматов // Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания: межвуз. сб. трудов. Л.: ЛИСИ, 1976. № 1. С. 40–43.
12. Исследование условий образования оксидов азота в топке чугунного секционного котла при рециркуляции продуктов сгорания природного газа / Е. П. Шматов [и др.] // Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания: межвуз. сб. трудов. Л.: ЛИСИ, 1983. № 7. С. 33–37.
13. Щукин, К. Реконструкция котла ПТВМ-100 с заменой горелок / К. Щукин // Аква-Терм. 2009. № 6. С. 20–21.
14. The European Union Standard: EN 676: 2003 Automatic Forced Draught Burners for Gaseous Fuels [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: http://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/appliances-burning-gaseous-fuels/index_en.htm. Дата доступа: 23.01.2016.
15. Высокие технологии для вашего успеха. Модернизация российских котлов ПТВМ, КВГМ, ДЕ, ДКВР. Презентационные материалы компании NORD-Крафт, Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.nordkraft.ru/modernizaciya.html>. Дата доступа: 23.01.2016.
16. Жигурс, А. Опыт АО «Ригас-Силтунс» в реконструкции водогрейных котлов КВГМ-50 и КВГМ-100 / А. Жигурс, А. Царс, С. Плескачев // Новости теплоснабжения. 2009. № 4. С. 34–39.
17. Гламаздин, П. М. Досвід модернізації водогрійних котлів ПТВМ-30 / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин // Житлово-комунальне господарство України. 2012. № 9 (52). С. 59–61.
18. Зельдович, Я. Б. Теория горения и детонации газов / Я. Б. Зельдович. М.: Изд-во АН СССР, 1944. 312 с.
19. Гламаздин, Д. П. Влияние температурного поля в топке котла на его экологические характеристики / Д. П. Гламаздин, П. М. Гламаздин // Вентиляция, освещение и теплогазоснабжение. 2011. Вып. 15. С. 78–81.
20. Горелки длиннопламенные и с регулируемой длиной факела для природного газа / А. В. Арсеньев [и др.]. М.: ВНИИЭгазпром, 1973. 40 с. (Использование газа в народном хозяйстве).
21. Барабаш, В. В. Опыт реконструкции и модернизации водогрейных котлов / В. В. Барабаш // Новости теплоснабжения. 2004. № 9. С. 35–37.
22. Росляков, П. В. Контролируемый химический недожог – эффективный метод снижения выбросов оксидов азота [Электронный ресурс] / П. В. Росляков, И. Л. Ионкин, Л. Е. Егорова. Режим доступа: http://www.analitech.ru/files/Controlled_chemical_underburning.pdf. Дата доступа: 23.01.2016.
23. Янкевич, В. И. Наладка газомазутных промышленных котельных / В. И. Янкевич. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
24. Hübner, C. Emissions of Oil and Gas Appliances and Requirements in European Standards / C. Hübner, R. Boos. Vienna: Austrian Energy Report, 1998. P. 56–59.

Поступила 25.01.2016 Подписана в печать 28.03.2016 Опубликовано онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Geletukha G. G., Zhelezka T. A., Drozdova A. I. (2012) Analysis of the Main Provisions of the Roadmap of the EU in the Energy Sector up to 2050. *Promislova Teplolekhnika* [Industrial Thermotechnics], 34 (5), 64–69 (in Ukrainian).
2. *National Plan to Reduce Emissions from the High Flame Plants. Final Draft* (2015) Available at: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>. (Accessed 23 January 2016) (in Ukrainian).
3. Primak A. V., Sigal A. I. (1989) *Methods and Apparatus for Reducing Nitrogen Emissions in Power Plants*. Kiev, Naukova Dumka. 44 (in Russian).
4. Zhukov E. (2013) Heat Condensing Boilers. *Akva-Term* [Aqua-Therm], (2), 10–13 (in Russian).
5. Sedlov A. S., Solodov A. P., Buhonov D. Yu. (2006) Obtaining Condensate from Flue Gases in a Pilot Plant of TPP-24. *Energoberezhenie i Vodopodgotovka* [Energy-Saving and Water Treatment], (5), 76–77 (in Russian).

6. Naydenov G. F. (1979) *Burners and Protection of the Atmosphere from Nitrogen Oxides*. Kiev, Tehnika. 96 (in Russian).
7. Vnukov A. K. (1966) *Reliability and Cost Efficiency of Boilers for Gas and Oil*. Moscow-Leningrad, Energia. 368 (in Russian).
8. Naydenov G. F. (1982) *Improving the Efficiency of the use of Gas and Oil in Power Plants*. Moscow, Energoizdat. 240 (in Russian).
9. Pavlov V. A., Steiner I. N. (1984) *Conditions of Optimization of Processes of Combustion of Liquid Fuels and Gas in Power and Industrial Plants*. Leningrad, Energoatomizdat. 120 (in Russian).
10. Krivonogov B. M. (1986) *Improving of the Efficiency of the Gas Combustion and the Environmental Protection*. Leningrad, Nedra. 280 (in Russian).
11. Shmatov E. P. (1976) Studies of the Effect of Recycling the Products of Natural Gas Combustion in the Boiler Furnace on its Thermal Performance. *Sovershenstvovanie Szhiganiya Gaza i Mazuta v Topkakh Kotlov i Snizhenie Vrednostei v Produktakh Sgoraniya. Mezhvuzovskiy Sbornik Trudov* [Improvement of the Gas and Heavy Oil Burning in Boilers and Reducing Hazards in the Combustion Products. Interuniversity Collection of Works]. Leningrad, Leningrad Institute of Civil Engineering, (1), 40–43 (in Russian).
12. Shmatov E. P., Krivonogov B. M., Shelin A. V., Rosenberg A. A. (1983) Study the Conditions of Formation of Nitrogen Oxides in the Furnace of Cast Iron Sectional Boiler During the Recirculation of Natural Gas Combustion Products. *Sovershenstvovanie Szhiganiya Gaza i Mazuta v Topkakh Kotlov i Snizhenie Vrednostei v Produktakh Sgoraniya. Mezhvuzovskiy Sbornik Trudov* [Improvement of the Gas and Heavy Oil Burning in Boilers and Reducing Hazards in the Combustion Products. Interuniversity Collection of Works]. Leningrad, Leningrad Institute of Civil Engineering, (7), 33–37 (in Russian).
13. Shchukin K. (2009) Reconstruction of the PTVM-100 Boiler with Replacement of Burners. *Akva-Term* [Aqua-Therm], (6), 20–21 (in Russian).
14. *The European Union Standard: EN 676: 2003 Automatic Forced Draught Burners for Gaseous Fuels*. Available at: http://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/appliances-burning-gaseous-fuels/index_en.htm. (Accessed: 23 January 2016).
15. *High-Tech for Your Success. Modernization of Russian Boilers of PTVM, KVGM, DE, DKVR. Presentation Materials of the NORD-Kraft Company, St. Petersburg*. Available at: <http://www.nordkraft.ru/modernizaciya.html>. (Accessed: 23 January 2016) (in Russian).
16. Zhigurs A., Tsars A., Pleskachev S. (2009) Experience of “Rigas-Siltuns” JSC in Reconstruction KVGM-50 and KVGM-100 Water-Heating Boilers. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (4), 34–39 (in Russian).
17. Glamazdin P. M., Glamazdin D. P. (2012) Research of the PTVM-30 Water-Heating Boilers Modernization. *Zhitlovo and Communal Gospodarstva* [Housing and Utilities], 52 (9), 59–61 (in Ukrainian).
18. Zeldovich Ya. B. (1944) *Theory of Combustion and Detonation of Gases*. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 312 (in Russian).
19. Glamazdin D. P., Glamazdin P. M. (2011) Effect of Temperature Field in the Furnace of the Boiler on its Environmental Characteristics. *Ventilyatsiya, Osveschenie i Teplogazosnabzhenie* [Ventilation, Lighting and Heat & Gas Supply], (15), 78–81 (in Russian).
20. Arsenev A. V., Maslov V. M., Vintovkin A. A., Druzhinin G. M. (1973) *Long-Flame Burners and the Burners with the Adjustable Length of the Torch for Natural Gas*. Moscow, VNMMEgazprom. 40 (in Russian).
21. Barabash V. V. (2004) Experience of Reconstruction and Modernization of Boilers. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (9), 35–37 (in Russian).
22. Roslyakov P. V., Ionkin I. L., Egorova L. E. (2015) *Controlled Chemical Underburning as an Effective Method of Reducing Emissions of Nitrogen Oxides*. Available at: http://www.analitech.ru/files/Controlled_chemical_underburning.pdf. (Accessed 23 January 2016) (in Russian).
23. Yankelevich V. I. (1988) *Gas-Oil Industrial Boiler Adjustment*. Moscow, Energoatomizdat. 216 (in Russian).
24. Hübner C., Boos R. (1998) *Emissions of Oil and Gas Appliances and Requirements in European Standards*. Vienna, Austrian Energy Report, 56–59.

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-260–271

УДК 536.2:532/533:674.047

Оптимизация аэродинамического режима работы сушильной камеры

В. А. Сычевский¹⁾, А. Д. Чорный¹⁾, Т. А. Баранова¹⁾

¹⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Одно из важных направлений развития промышленного производства – переработка древесины, в которой сушка занимает значительное место. Основным в настоящее время является конвективный способ сушки древесины в сушильных камерах. Однако в научной литературе не уделяется должного внимания структуре газового потока в сушильных установках и, в частности, в зазорах между горизонтальными рядами пиломатериалов в штабеле. В то время как воздух, протекающий в пространстве между горизонтальными рядами, способствует нагреву древесины и удалению влаги из пограничного слоя. В статье исследуется аэродинамика экспериментального лесосушильного стенда Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Геометрическая структура лесосушильного стенда сложная. Поэтому расчет аэродинамики сушильного агента в камере осуществлен на основе программного комплекса ANSYS Fluent 14.5. Для этого создана расчетная геометрическая модель конвективной камерной сушильной установки. Разработана физико-математическая модель аэродинамики конвективной сушки пиломатериалов в лесосушильном стенде Института тепло- и массообмена. На основе проведенных расчетов выполнен анализ структуры потока сушильного агента, выявлены застойные зоны. Установлено, что лесосушильный стенд работает не в оптимальном аэродинамическом режиме. Для определения оптимального аэродинамического режима сушильной камеры проведены расчеты с учетом дополнительного канала между задней стенкой камеры и штабелем, при отсутствии экрана сверху штабеля и наличии экрана между полом и штабелем, при изменении скорости сушильного агента, различных перепадах давления на вентиляторе, вариации количества межрядовых прокладок. По результатам моделирования предложены рекомендации по оптимизации аэродинамики сушильной установки: необходимо снизить скорость сушильного агента в камере за счет уменьшения перепада давления на вентиляторе с начального (150 Па) до конечного (90 Па), а также установить в сушильной камере дополнительный экран между полом и штабелем.

Ключевые слова: аэродинамический режим, сушильная камера, переработка древесины, лесосушильный стенд

Для цитирования: Сычевский, В. А. Оптимизация аэродинамического режима работы сушильной камеры / В. А. Сычевский, А. Д. Чорный, Т. А. Баранова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 260–271

Адрес для переписки

Сычевский Вячеслав Александрович
Институт тепло- и массообмена
имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 284-11-39
office@hmti.ac.by

Address for correspondence

Sychevsky Vyacheslav A.
A. V. Luikov Heat and Mass Transfer
Institute of NAS of Belarus
15 P. Brovka str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 284-11-39
office@hmti.ac.by

Optimization of Aerodynamic Conditions of the Chamber Drier Operation

V. A. Sychevsky¹⁾, A. D. Chorny¹⁾, T. A. Baranova¹⁾

¹⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Wood utilization is a critical direction of the industrial production advancement, where desiccation of wood holds a prominent place. Convective drying in chamber driers is the present-day dominant technique for wood desiccation. Nevertheless, available scientific literature on the subject does not place high emphasis on the issue of gas flow structure inside the drier installations and, in particular, in the clearance between horizontal rows of stacked saw timber. Whereas, the air flowing between horizontal rows facilitates wood heating and moisture removing from the boundary layer. The present article studies aerodynamics of the experimental timber drying test stand at the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus. The timber drying test stand geometry structure is complicated, which is why aerodynamics valuation of the drier agent in the chamber involves the software system ANSYS Fluent 14.5. For that end, the researchers developed the convective drier installation geometrical model. A physicomathematical simulation was developed for sawn timber convective drying aerodynamics in the timber drying test stand of the Heat and Mass Transfer Institute. Based on the computations made, the drier agent flow configuration was analyzed, stagnant pockets identified. It was found that the timber drying test stand was not operating within its optimal aerodynamic conditions. The drying chamber optimal aerodynamic conditions determination includes accounting for an additional canal between the chamber rear wall and the timber stack, absence of the screen above the stack, and presence of the screen between the floor and the stack. As well as variation of the drying agent speed, pressure differential at the blower, the inter-row gobb amount variation. The paper offers recommendations on optimizing the drying installation aerodynamics based on the numerical simulation results. To this effect, speed of the drier agent in the chamber should be reduced at the expense of reduction of pressure differential at the blower: from initial (150 Pa) to final (90 Pa). It is necessary as well to install an additional screen between the chamber floor and the stack.

Keywords: aerodynamic conditions, chamber drier, wood utilization, timber drying test stand

For citation: Sychevsky V. A., Chorny A. D., Baranova T. A. (2016) Optimization of Aerodynamic Conditions of the Chamber Drier Operation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 260–271 (in Russian)

Республика Беларусь – одна из крупнейших европейских лесных держав. Ее лесной фонд оценивается в 9,4 млн га, а объем древесины на корню – около 1,6 млрд куб. м. В Беларуси ежегодно заготавливается 15 млн куб. м древесины, которая используется в лесопильном, фанерном, мебельном и других производствах. Значительный объем продукции отправляется на экспорт, поэтому развитие данной отрасли для нашей страны имеет стратегическое значение.

Одно из важнейших направлений развития промышленного производства – переработка древесины, в которой сушка занимает первое место. Основным является конвективный способ сушки древесины в сушильных камерах. Режимы камерной сушки пиломатериалов в производственных условиях координируются по времени от ее начала или по влажности материала. Такие способы сушки древесины применимы при мягких режимах, когда время сушки жестко не ограничивается в процессе производства пиломатериалов. Тем не менее в подавляющем числе случаев это приводит к неэффективным затратам энергии. В последнее время с целью повыше-

ния производительности сушки древесины все чаще используются жесткие режимы, которые дают меньшую продолжительность сушки, но приводят к развитию напряжений в материале.

В настоящее время работа сушильных камер изучается с целью совершенствования их аэродинамики, повышения энергоэффективности и снижения неравномерного энергоподвода. В связи с этим при разработке новых способов сушки древесины управлению и оптимизации аэродинамики сушильного агента в камере отводится важная роль. Формирование неоднородностей поля скорости как по подводящему тракту, так и при его распределении по всей поверхности высушиваемого материала существенно влияет на тепломассообменные процессы. Поэтому предварительное моделирование поля скорости в сушильной камере необходимо, чтобы свести к минимуму не только потери при движении потока, но и выявить очаги возникновения застойных зон.

Результаты экспериментальных исследований и численных расчетов структуры потока и переноса теплоты во время паровой сушки древесины сосны и дуба приводятся в [1]. В [2, 3] выполнено комплексное экспериментальное исследование в промышленных и лабораторных условиях аэродинамики сушильной камеры с целью направленного перераспределения энергоподвода в рабочей зоне. Доказана возможность управления интенсивностью сушки пиломатериалов при неизменных начальных параметрах теплоносителя за счет выравнивания профилей скоростей. Утверждается, что на практике определить зоны, где образуются «паразитные» потоки, довольно сложно, а в некоторых случаях и невозможно из-за конструктивных особенностей камеры сушки. Поэтому следует использовать современные программные средства для моделирования протекающих физических процессов.

В [4] показано, что на переднем и заднем краях расположенных в линию досок в штабеле образуются вихри, которые отрицательно сказываются на аэродинамике потока и процессах тепломассопереноса в штабеле. В сушильной камере воздушный поток преодолевает ряд местных сопротивлений, обусловленных наличием теплообменника, вентилятора, штабеля и геометрией сушилки (изменение направления потока воздуха). В [5] изучены возможности уменьшения потерь давления на входе и выходе из штабеля путем изменения формы краев досок в нем. Это изменение достигается постепенным расширением и сужением входа и выхода из штабеля. Авторы [5] утверждают, что проведенные численные расчеты и экспериментальные исследования показывают падение аэродинамического сопротивления штабеля.

Однако в большинстве научных источников не уделяется должного внимания структуре газового потока в зазорах между горизонтальными рядами пиломатериалов в штабеле, хотя воздух, протекающий в пространстве между горизонтальными рядами, способствует нагреву древесины и удалению влаги из пограничного слоя. Поэтому изучение воздушного потока может дать информацию о способах оптимизации аэродинамики сушильной установки с целью достижения качественной сушки пиломатериалов [6–10].

В статье как объект исследования рассмотрен экспериментальный лесосушильный стенд Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ИТМО). Сушильная установка представляет собой прямо-

угольную камеру (рис. 1), в которой ограждающие конструкции, включая потолок и пол, состоят из тепло- и влагоизоляционных материалов. Сушильная камера является установкой периодического действия. Для организации конвективного тепло- и массопереноса между сушильным агентом и древесиной в камере размещается вентилятор, обеспечивающий необходимую скорость потока. В большинстве конвективных сушилок скорость воздуха в штабеле составляет 1,5–3,0 м/с. В установке, представленной на рис. 1, вентилятор создает перепад давления 150 Па, его производительность 8800 м³/ч, а диаметр выходного отверстия 0,56 м.

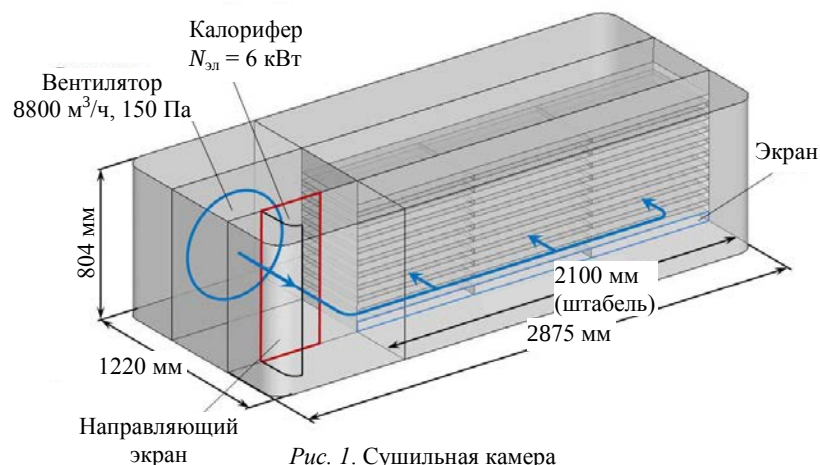


Рис. 1. Сушильная камера
Fig. 1. Chamber drier

Для интенсификации влагопереноса сушильный агент и древесину нагревают. С этой целью в камере ставят калорифер. Воздух, прежде чем попасть в штабель, разгоняется вентилятором и проходит через калорифер, где его температура повышается. Двигаясь через штабель, он нагревает древесину. В большинстве случаев сушка при атмосферном давлении реализуется в установках при температуре, не превышающей 100 °С. Тепловая мощность калорифера составляет 6 кВт. За калорифером по ходу движения воздуха размещается штабель.

Штабель представляет собой прямоугольную конструкцию размерами 2100×450×650 мм, где указанные величины соответствуют длине, ширине и высоте. Он формируется из досок толщиной 40 мм. Пиломатериалы укладываются сплошными рядами без шпаций. Горизонтальные ряды пиломатериалов в штабеле разделяются межрядовыми прокладками толщиной 25 мм, которые располагаются вертикально одна над другой. Весь штабель укладывается на 50-миллиметровые подставки, отделяющие его от пола камеры.

Математическая модель движения сушильного агента в камере включает в себя уравнение неразрывности и переноса количества движения сушильного агента. Расчет числа Рейнольдса показал, что в камере реализуется развитый турбулентный режим течения сушильного агента. Поэтому для описания турбулентного режима течения использовали k - ϵ -модель турбулентности со стандартными пристеночными функциями. Аэродинамический расчет проведен с помощью программного комплекса ANSYS Fluent 14.5.

Физическая картина движения воздуха в сушильной камере и его структура рассмотрены в [11], где выполнен анализ структуры потока сушильного агента, выявлены застойные зоны, а также зоны сильного вихреобразования. Отметим важные особенности движения воздуха. Во-первых, образующиеся вихри приводят к появлению застойных областей, в которых сушильный агент находится намного дольше, чем воздух, протекающий при поступательном движении с одной стороны штабеля к другой. В таких застойных зонах возможен неэффективный подвод теплоты и отвод влаги от штабеля. Во-вторых, вихри приводят к образованию возвратного («паразитного») течения воздуха с выходного канала во входной канал через штабель, минуя калорифер. Такое движение также приводит к неэффективному использованию сушильного агента.

Проведенные исследования показывают, что структура течения сушильного агента в рассматриваемом лесосушильном стенде ИТМО обусловлена сложным строением каналов, необходимостью создания циркуляционного потока и соблюдением заданной технологии сушки, скорости прохождения воздуха через штабель. Все это приводит к вихревому режиму движения в камере и дает основание сделать заключение о том, что добиться равномерного движения воздуха в такой сушилке не представляется возможным. Поэтому необходимо минимизировать влияние неоднородности движения воздуха в камере.

Вычислительный эксперимент показал, что создание дополнительного канала между задней стенкой камеры и штабелем и/или снятие экрана сверху штабеля не приводят к улучшению структуры потока в камере. Исчезновение вихрей в одних местах неизбежно приводит к их образованию в других областях. Кроме того, при открытом канале и без экрана воздух проходит мимо штабеля и не сушит древесину, тем самым уменьшая эффективность работы камеры.

Расчеты показали, что одним из наиболее результативных способов снижения интенсивного вихреобразования в воздушном потоке является уменьшение скорости сушильного агента. При этом можно добиться почти полного отсутствия зон завихренности потока в штабеле. Однако при малых скоростях потока возможно возвратное движение отработанного агента через штабель, что недопустимо. В дополнение к этому следует отметить, что эффективность конвективной сушки при малых скоростях значительно снижается. Так, накопленный опыт по вынужденной конвективной камерной сушке древесины показывает, что скорость воздуха в штабеле не должна быть менее 1 м/с.

С целью выбора оптимального значения перепада давления в вентиляторе ΔP_f , соответствующего допустимому диапазону скоростей в штабеле, выполнены расчеты при 15, 30, 50, 70, 90, 120 и 150 Па. Визуальный сравнительный анализ движения воздуха в штабеле показал, что происходит качественная смена структуры движения сушильного агента при переходе от $\Delta P_f = 150$ Па к $\Delta P_f = 120$ Па, характеризующаяся резким снижением неоднородности потока в штабеле. При перепаде в $\Delta P_f = 120$ Па, как видно из рис. 2, распределение скорости потока в штабеле достаточно равномерное. Подобное распределение происходит при перепаде в $\Delta P_f = 90$ Па. При переходе от $\Delta P_f = 90$ Па к $\Delta P_f = 70$ Па наблюдается очередная качественная смена структуры течения.

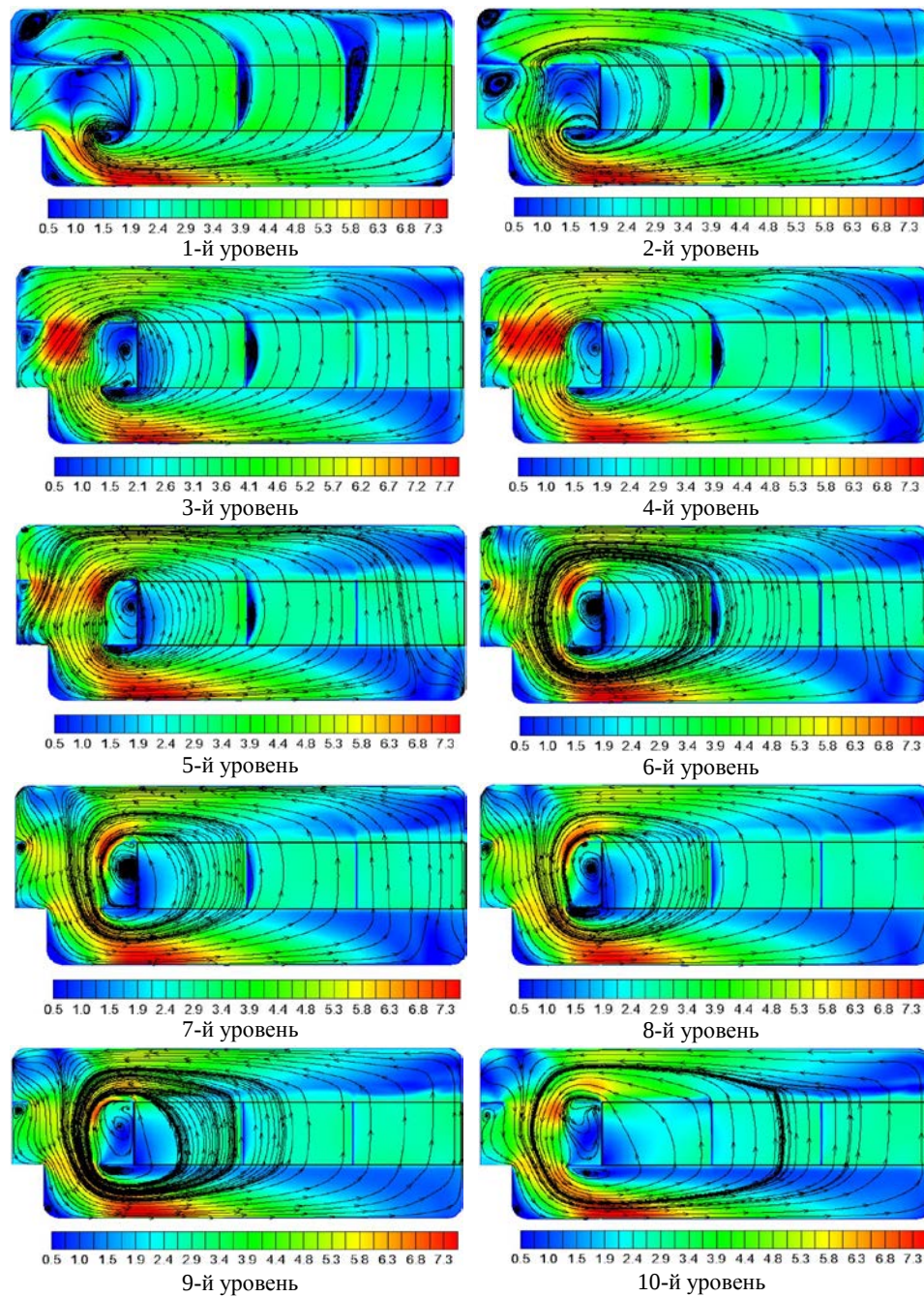


Рис. 2. Распределение скорости и линий тока в срединных плоскостях между досками штабеля при $\Delta P_f = 120$ Па

Fig. 2. Distribution of flow rate and flux lines in middle planes between the planks in stacks at $\Delta P_f = 120$ Pa

В данном случае она характеризуется появлением резкой неоднородности в величине скорости воздуха вдоль штабеля, в чем можно убедиться при сравнении рис. 2, 3. Наиболее сильное различие в скорости проявляет-

ся в области между вентилятором и первым рядом прокладок и всем остальным штабелем. Дальнейшее снижение перепада давления до $\Delta P_f = 15$ Па не привело к смене характера течения в штабеле.

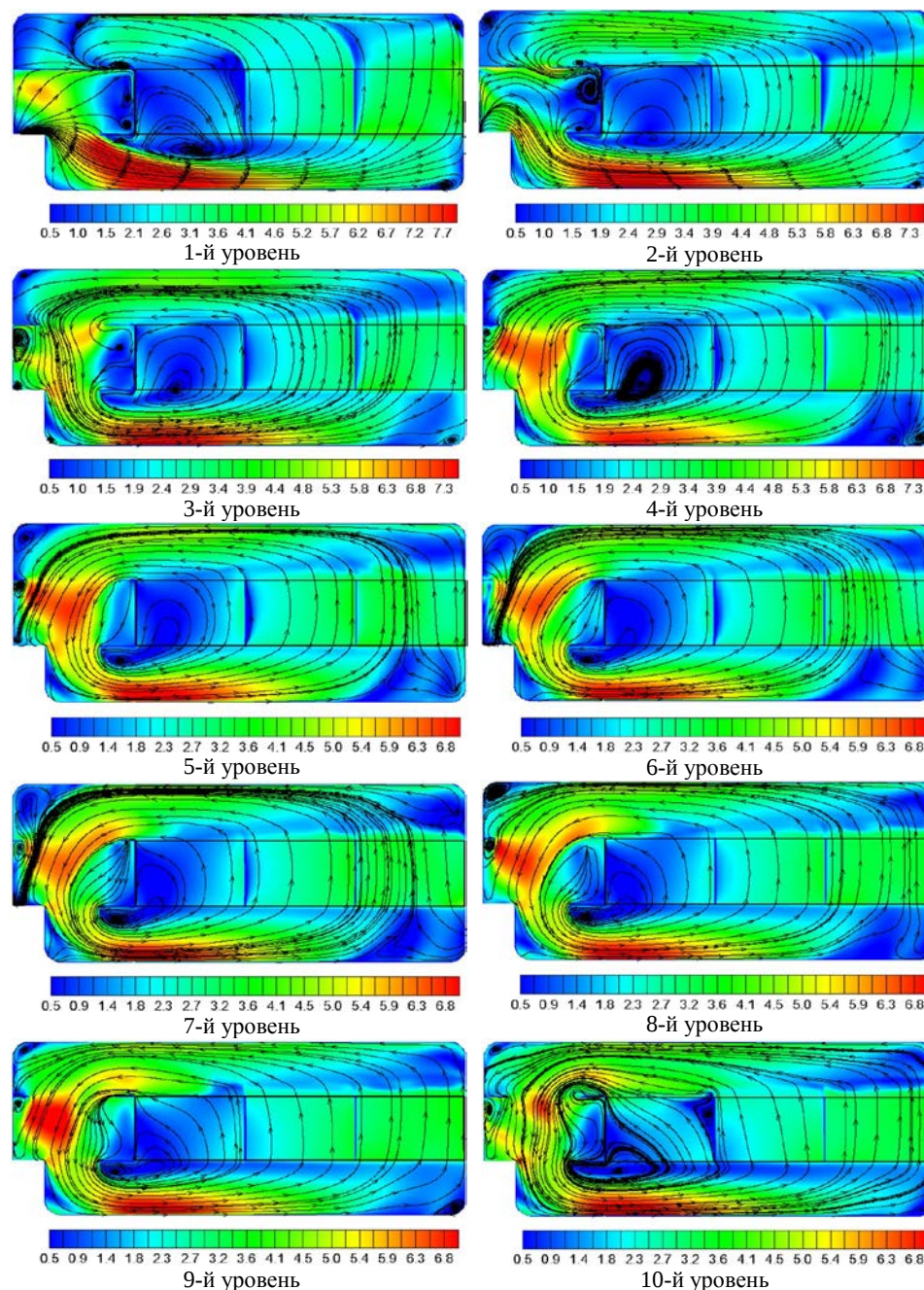


Рис. 3. Распределение скорости и линий тока в срединных плоскостях между досками штабеля при $\Delta P_f = 70$ Па

Fig. 3. Distribution of flow rate and flux lines in middle planes between the planks in stacks at $\Delta P_f = 70$ Pa

Качественно картина осталась без изменений. Таким образом, малая скорость сушильного агента приводит к существенному сокращению числа вихрей. Однако при этом движение сушильного агента через штабель сильно неоднородное.

Минимальное и максимальное значения скорости в штабеле, среднее значение скорости на входе, в центре и на выходе из штабеля в зависимости от перепада давления на вентиляторе приведены в табл. 1. Учитывая, что диапазон скоростей в штабеле должен находиться в пределах от 1,5 до 3,5 м/с, из табл. 1 выбираем оптимальное значение перепада давления на вентиляторе, которое составляет $\Delta P_f = 90$ Па.

Таблица 1

Зависимость скорости потока в штабеле от перепада давления на вентиляторе
Flux rate in stacks dependence of pressure differential at the blower

Перепад давления, Па	Скорость, м/с		Среднее значение скорости, м/с		
	мини-мальная	макси-мальная	на входе в штабель	в центре штабеля	на выходе из штабеля
15	0,1	1,9	1,2	1,0	1,1
30	0,1	2,6	1,6	1,4	1,5
50	0,3	3,6	2,1	1,9	2,0
70	0,3	4,3	2,5	2,3	2,4
90	1,0	3,7	2,6	2,4	2,5
120	0,8	4,3	2,8	2,6	2,7
150	0,4	7,2	3,9	3,4	3,6

Кроме того, выполнены расчеты динамики потока с учетом установки экрана между полом и штабелем. Наличие экрана приводит к сильному уменьшению количества вихрей в штабеле и отсутствию обратного движения воздуха. Так, удовлетворительные результаты получаются при наличии экрана между полом и штабелем и перепаде давления на вентиляторе $\Delta P_f = 90$ Па. Приведем расчеты при одновременном использовании этих факторов (наличие экрана и $\Delta P_f = 90$ Па). Расчет, когда задан перепад $\Delta P_f = 90$ Па и отсутствует экран между полом и штабелем, представлен на рис. 4. Расчет, когда задан перепад $\Delta P_f = 90$ Па и имеется экран между полом и штабелем, иллюстрирует рис. 5. Сравнение этих результатов показывает, что второй вариант дает более равномерное распределение скорости потока в штабеле, а следовательно, он является предпочтительным. Таким образом, в рассматриваемом экспериментальном лесосушильном стенде следует уменьшить скорость движения воздуха в камере посредством снижения перепада давления на вентиляторе до $\Delta P_f = 90$ Па и установить экран между полом и штабелем.

При заданных характеристиках вентилятора влияние на структуру потока оказывает также количество межрядовых прокладок. Вычислительные эксперименты показали сильную и в то же время неоднозначную зависимость вихреобразования в штабеле от числа рядов прокладок в нем. В настоящее время крайне сложно представить осмысленную и однозначную зависимость структуры потока от числа межрядовых прокладок в штабеле.

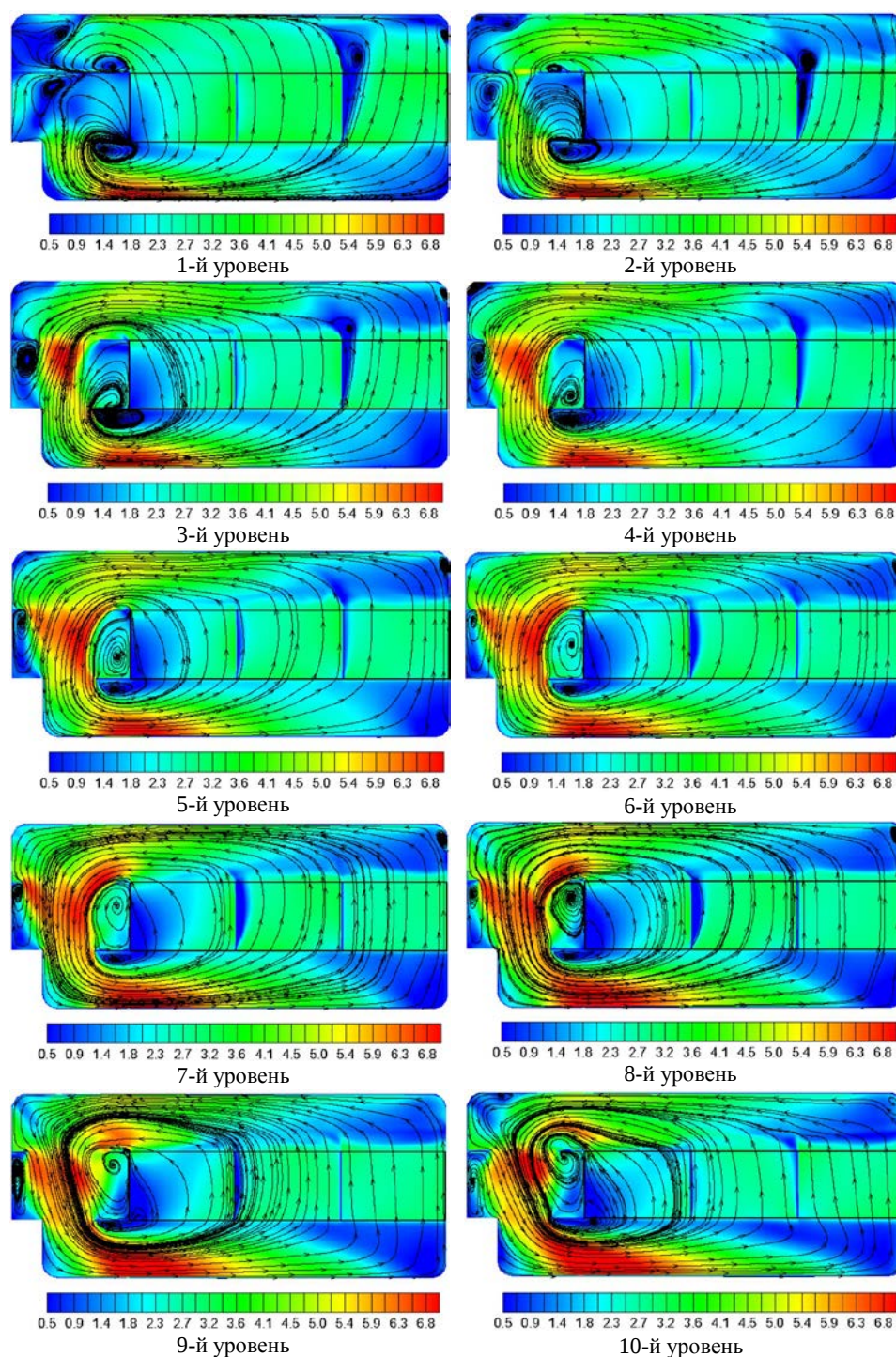


Рис. 4. Распределение скорости и линий тока в срединных плоскостях между досками штабеля при $\Delta P_f = 90$ Па и отсутствии экрана между полом и штабелем

Fig. 4. Distribution of flow rate and flux lines in middle planes between the planks in stacks at $\Delta P_f = 90$ Pa and absence of the screen between the floor and the stack

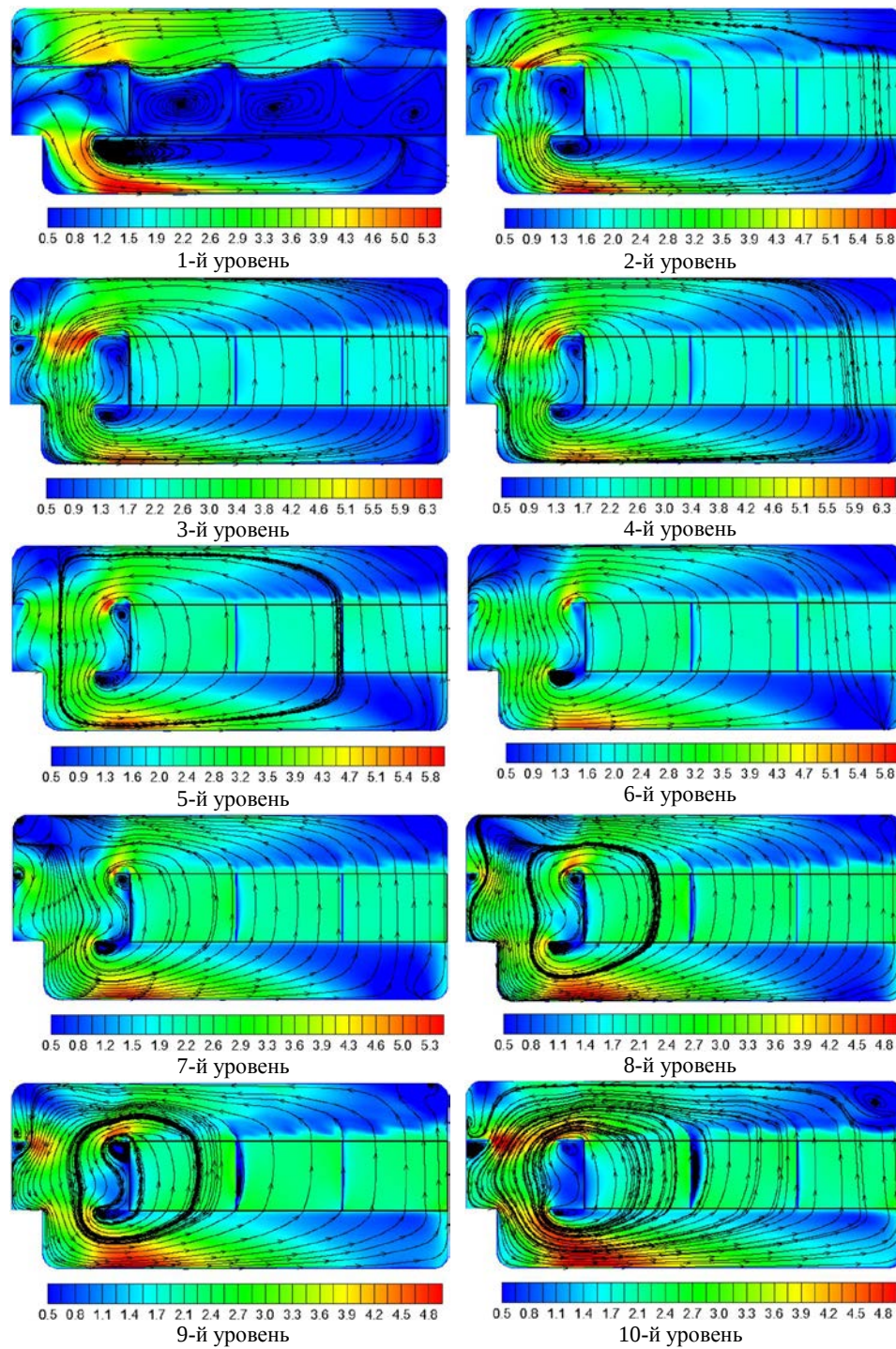


Рис. 5. Распределение скорости и линий тока в срединных плоскостях между досками штабеля при $\Delta P_f = 90$ Па и наличии экрана между полом и штабелем

Fig. 5. Distribution of flow rate and flux lines in middle planes between the planks in stacks at $\Delta P_f = 90$ Pa and the screen present between the floor and the stack

ВЫВОД

Создана расчетная геометрическая модель конвективной камерной сушильной установки. Разработана физико-математическая модель аэродинамики конвективной сушки пиломатериалов в лесосушильном стенде Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Установлено, что сушильная камера работает не в оптимальном аэродинамическом режиме. Поэтому сформулированы рекомендации по оптимизации аэродинамики сушильной установки. Во-первых, необходимо снизить скорость сушильного агента в камере за счет уменьшения перепада давления, создаваемого вентилятором. Вместо заданного значения перепада давления на вентиляторе $\Delta P_f = 150$ Па необходимо использовать $\Delta P_f = 90$ Па. Во-вторых, следует в сушильной камере установить дополнительный экран между полом и штабелем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barański, J. Experimental Study and Numerical Simulation of Flow Pattern and Heat Transfer During Steam Drying Wood / J. Barański, M. A. Wierzbowski, J. A. Stasiek // The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. 4–7th May, 2010, Edinburgh. The Final Conference of COST Action E53. Edinburgh, 2010.
2. Федяев, А. А. Влияние непроизводительных потоков агента сушки на качество пиломатериала / А. А. Федяев, Д. А. Наговицын // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 3. С. 85–88.
3. Федяев, А. А. Совершенствование газораспределительных устройств технологического оборудования / А. А. Федяев // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 87–90.
4. Sun, Z. F. Numerical Simulation of Flow in an Array of In-Line Blunt Boards: Mass Transfer and Flow Patterns / Z. F. Sun // Chemical Engineering Science. 2001. Vol. 56, No 3. P. 1883–1896.
5. Bedeleian, I. B. Investigations Concerning the Possibility to Minimize the Stacks Aerodynamic Resistance / I. B. Bedeleian, D. Sova // The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. 4–7th May, 2010, Edinburgh. The Final Conference of COST Action E53. Edinburgh, 2010.
6. Лебедев, П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П. Д. Лебедев. М.; Л., Госэнергоиздат, 1962. 320 с.
7. Справочник по сушке древесины / Е. С. Богданов [и др.]; под ред. Е. С. Богданова. М.: Лесная промышленность, 1990. 320 с.
8. Кречетов, И. В. Сушка древесины / И. В. Кречетов. М.: Лесная промышленность, 1980. 432 с.
9. Расев, А. И. Сушка древесины / А. И. Расев. М.: Высш. школа, 1980. 181 с.
10. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. 70 с.
11. Сычевский, В. А. Численное моделирование аэродинамики лесосушильной камеры / В. А. Сычевский, Т. А. Баранова // Тепло- и массоперенос-2014: сб. науч. тр. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси; редкол.: О. Г. Пенязков [и др.]. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, 2015.

REFERENCES

1. Barański J., Wierzbowski M. A., Stasiak J. A. (2010) Experimental Study and Numerical Simulation of Flow Pattern and Heat Transfer During Steam Drying Wood. *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. 4–7th May, 2010, Edinburgh. The Final Conference of COST Action E53.*
2. Fedyaev A. A., Nagovitsin D. A. (2012) Effects of the Drying Agent Non-Productive Flows on the Sawn Goods Quality. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], (3), 85–88 (in Russian).
3. Fedyaev A. A. (2009) Development of Gas-Distributing Hardware of the Production Equipment. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], (2), 87–90 (in Russian).
4. Sun Z. F. (2001) Numerical Simulation of Flow in an Array of In-Line Blunt Boards: Mass Transfer and Flow Patterns. *Chemical Engineering Science*, 56 (3), 1883–1896. DOI: 10.1016/S0009-2509(00)00464-4.
5. Bedelea I. B., Sova D. (2010) Investigations Concerning the Possibility to Minimize the Stacks Aerodynamic Resistance. *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. 4–7th May, 2010, Edinburgh. The Final Conference of COST Action E53.*
6. Lebedev P. D. (1962) *Drier Apparatuses Engineering*. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat. 320 (in Russian).
7. Bogdanov E. S., Kozlov V. A., Kuntyshev V. B., Melekhov V. I. (1990) *Reference Book on Wood Desiccation*. Moscow, Lesnaia Promyshlennost. 320 (in Russian).
8. Krechetov I. V. (1980) *Desiccation of Wood*. Moscow, Lesnaia Promyshlennost. 432 (in Russian).
9. Rasev A. I. (1980) *Desiccation of Wood*. Moscow, Vysshaya Shkola. 181 (in Russian).
10. Guidance Technical Documents on Technology of Wood Chamber Drying. Arkhangelsk: TsNIIMOD, 1985. 70 (in Russian).
11. Sychevsky V. A., Baranova T. A. (2015) A Timber-Drying Chamber Aerodynamics Computer Simulation. *Teplo- i Massopereenos-2014: sb. nauch. tr.* [Heat and Mass Transfer-2014: Coll. of Theor. Works]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (in Russian).

Received: 25.06.2015

Accepted: 02.09.2015

Published online: 03.06.2016

DOI: 1021122/1029-7448-2016-59-3-272–284

УДК 697.9

О реальной оценке энергоэффективности жизнеобеспечения жилых зданий при централизованной системе теплоснабжения

С. Н. Осипов¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В соответствии с Директивой Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности Республики Беларусь» экономия топливно-энергетических ресурсов по республике в 2010–2015 гг. должна составить 7,1–8,9 млн т у. т., в том числе 1,00–1,25 млн т у. т. за счет оптимизации теплоснабжения и 0,25–0,40 млн т у. т. за счет увеличения термосопротивления ограждающих конструкций зданий, сооружений и жилищного фонда. Таким образом, если в процессе оптимизации теплоснабжения ожидается получение примерно 18 % общей экономии тепловых ресурсов, то за счет увеличения термосопротивления ограждающих конструкций зданий и сооружений различного назначения – только около 3–5 %, а жилищного фонда – даже несколько меньше. До 1994 г. в жилищном секторе Республики Беларусь годовой расход теплоты на отопление и вентиляцию в среднем составлял 130 кВт·ч/(м²·год) (~56 %), на горячее водоснабжение – около 100 кВт·ч/(м²·год) (~44 %). В жилых зданиях, построенных с 1994 по 2009 г., потребление теплоты на отопление и вентиляцию уже составляет 90 кВт·ч/(м²·год), на горячее водоснабжение – примерно 70 кВт·ч/(м²·год). В зданиях современной массовой постройки на отопление и вентиляцию затрачивается 60 кВт·ч/(м²·год) (~46 %), на горячее водоснабжение – примерно 70 кВт·ч/(м²·год) (~54 %). В отдельных современных жилых зданиях с утилизацией вторичных энергоресурсов удаляемого теплого воздуха на отопление и вентиляцию приходится около 30–40 кВт·ч/(м²·год) теплоты. Повышение энергоэффективности жилых зданий за счет уменьшения затрат теплоты на отопление и вентиляцию – последнее звено в системе экономии энергоресурсов. Первыми звеньями в процессе энергоэффективности являются получение теплоты и ее транспортирование по магистральным и наружным распределительным сетям. Благодаря оптимизации схем теплоснабжения и модернизации тепловых сетей с использованием дорогих (200–300 дол. США за 1 м), но весьма эффективных предварительно изолированных труб с 2006 по 2013 г. получена экономия 2,7 млн т у. т. Общие потери тепловой энергии в коммунальном хозяйстве Беларуси в марте 2014 г. составили 17 %, в то время как в 2001 г. они были на уровне 26 %, а в 1990-м – более 30 %. С учетом многоступенчатости и многофакторности (электричество, тепло- и водоснабжение) энергосбережения жилищного сектора реальная оценка энергоэффективности жизнеобеспечения жилых зданий должна производиться в тоннах условного топлива в единицу времени.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергетические потери, производство, распределение, транспортирование, топливо, теплота сгорания

Для цитирования: Осипов, С. Н. О реальной оценке энергоэффективности жизнеобеспечения жилых зданий при централизованной системе теплоснабжения / С. Н. Осипов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 272–284

Адрес для переписки
Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища – НИПТИС
имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence
Osipov Sergey N.
Government Enterprise “Institute of Habitation –
NIPTIS named after Ataev S. S.”
15 F. Skorina str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

On Reasonable Estimate of Energy Performance of the Residential Buildings Sustenance with Centralized Heat-Supply System

S. N. Osipov¹⁾

¹⁾Government Enterprise “Institute of Habitation – NIPTIS named after Ataev S. S.”
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. As consisted with Directive No 3 of President of the Republic of Belarus of June, 14th 2007 ‘Economy and Husbandry – the Major Factors of Economic Security of the Republic of Belarus’, saving fuel-and-energy resources over the republic in 2010–2015 should amount to 7,1–8,9 MIO tons of fuel equivalent including 1,00–1,25 MIO tons of fuel equivalent at the expense of heat-supply optimization and 0,25–0,40 MIO tons of fuel equivalent at the expense of increasing enclosing structures heat resistance of the buildings, facilities and housing stock. It means, where it is expected to obtain around 18 % of general thermal resources economy in the process of heat-supply optimization, then by means of enhancing the cladding structure heat resistance of the buildings and constructions of various applications – only about 3–5 % and even a bit less so of the housing stock. Till 1994, in residential sector of the Republic of Belarus, the annual heat consumption of the heating and ventilation averaged more than 130 kW·h/(m²·year) (~56 %), of the hot-water supply – around 100 kW·h/(m²·year) (~44 %). In residential houses, built from 1994 to 2009, heat consumption of the heating and ventilation is already 90 kW·h/(m²·year), of the hot-water supply – around 70 kW·h/(m²·year). In buildings of modern mainstream construction, they expend 60 kW·h/(m²·year) (~46 %) on heating and ventilation and 70 kW·h/(m²·year) (~54 %) on hot-water supply. In some modern residential buildings with the exhausted warm air secondary energy resource utilization, the heating and ventilation takes around 30–40 kW·h/(m²·year) of heat. Raising energy performance of the residential buildings by means of reducing heat expenses on the heating and ventilation is the last segment in the system of energy resources saving. The first segments in the energy performance process are producing heat and transporting it over the main lines and outside distribution networks. In the period from 2006 to 2013, by virtue of the heat-supply schemes optimization and modernizing the heating systems using valuable (200–300 \$US per 1 m) though hugely effective preliminary coated pipes, the economy reached 2,7 MIO tons of fuel equivalent. Heat-energy general losses in municipal services of Belarus in March 2014 amounted up 17 %, whilst in 2001 they were at the level of 26 % and in 1990 – more than 30 %. With a glance to multi-staging and multifactorial nature (electricity, heat and water supply) of the residential sector energy saving, the reasonable estimate of the residential buildings sustenance energy efficiency should be performed in tons of fuel equivalent in a unit of time.

Keywords: energy efficiency, energy losses, production, distribution, transportation, fuel, combustion heat

For citation: Osipov S. N. (2016) On Reasonable Estimate of Energy Performance of the Residential Buildings Sustenance with Centralized Heat-Supply System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 272–284 (in Russian)

Решение проблемы повышения энергоэффективности жилых и других зданий началось в СССР еще в 70-е гг. прошлого столетия [1–3], дальнейшее развитие оно получило в 1980-е гг. [4–6]. В 1983-м совместным приказом по министерствам приборостроения и средств автоматизации СССР (г. Москва) и высшего и среднего образования БССР (г. Минск) в Белорусском политехническом институте (ныне БНТУ) была создана отраслевая научно-исследовательская лаборатория экономии тепловых ресурсов. В ней в течение нескольких лет проводились научно-исследовательские работы (НИР) по экономии тепловых ресурсов [7].

В 1981–1985 гг. в Белорусской ССР в институте БелНИИПградостроительства, входившем в систему Госстроя БССР, разработали рекомендации [8] по совершенствованию территориальной организации БССР, в которых учитывалась оптимизация схем энергоснабжения жилых территорий городских поселений с экономией энергии и планировочными решениями. При этом были отмечены топливно-энергетические балансы жилых территорий с учетом экономии топливно-энергетических ресурсов.

Оптимизация применения энергоэффективных решений при строительстве и эксплуатации жилых зданий – не только технически, но и экономически сложная проблема. В соответствии с Директивой Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности Республики Беларусь» [8] экономия топливно-энергетических ресурсов по республике в 2010–2015 гг. должна составить 7,1–8,9 млн т у. т., в том числе 1,00–1,25 млн т у. т. за счет оптимизации теплоснабжения и 0,25–0,40 млн т у. т. за счет увеличения термосопротивления ограждающих конструкций зданий, сооружений и жилищного фонда. Таким образом, если в процессе оптимизации теплоснабжения ожидается получение примерно 18 % общей экономии тепловых ресурсов, то за счет увеличения термосопротивления ограждающих конструкций зданий и сооружений различного назначения – только около 3–5 %, а жилищного фонда – даже несколько меньше.

В понятие оптимизации теплоснабжения входят различные варианты экономии энергоресурсов, в том числе уменьшение потерь теплоты в магистральных и распределительных сетях теплоснабжения, увеличение использования теплопроизводительности ТЭЦ, что повышает их общий КПД и снижает удельный расход топлива. Так, если нормативные потери теплоты в сетях теплоснабжения г. Минска в 80-е гг. XX в. составляли около 30 %, то в 2015 г. они должны быть уменьшены до 8 %.

До 1994 г. в жилищном секторе Республики Беларусь годовой расход теплоты на отопление и вентиляцию в среднем составлял 130 кВт·ч/(м²·год) (~56 %), на горячее водоснабжение – около 100 кВт·ч/(м²·год) (~44 %). В жилых зданиях, построенных с 1994 по 2009 гг., потребление теплоты на отопление и вентиляцию уже составляет 90 кВт·ч/(м²·год), на горячее водоснабжение – около 70 кВт·ч/(м²·год). В зданиях современной массовой постройки на отопление и вентиляцию затрачивается 60 кВт·ч/(м²·год) (~46 %), на горячее водоснабжение – примерно 70 кВт·ч/(м²·год) (~54 %). В отдельных современных жилых зданиях с утилизацией вторичных энергоресурсов (ВЭР) удаляемого теплого воздуха на отопление и вентиляцию приходится около 30–40 кВт·ч/(м²·год) теплоты. Если уменьшение расхода теплоты на отопление и вентиляцию объясняется резким ростом (примерно в три раза) нормативного термического сопротивления ограждающих конструкций жилых зданий, то снижение потребления теплоты на горячее водоснабжение примерно на 30 % можно объяснить ростом цен на горячую воду, что заставляет потребителей расходовать ее более экономно.

Значительный интерес для развития процесса повышения энергоэффективности жилых зданий в Республике Беларусь представляет изменение требований по снижению энергопотребления в США за период 2010–2030 гг. [9], которые приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, энергопотребление (без учета потребления электрической энергии) в жилых зданиях США, построенных в 2007 г., примерно на 20–30 % меньше по сравнению с таковыми в Беларуси ($90 + 70 = 160 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$) (в США – $104,5\text{--}128,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$). Следует отметить, что еще в 1999–2001 гг. стандарт США разрешал энергопотребление (без учета потребления электрической энергии) в размере $147,3\text{--}163 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$. К 2015 г. это различие увеличилось примерно до 35–50 % ($56,9\text{--}72,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ в США и $110 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ в Беларуси) для практически одинаковых климатических условий.

Таблица 1

Требования по снижению энергопотребления ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$) в США
Lowering power-consumption requirements ($\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{year})$) in the USA

Год	Стандарт				Путеводитель по энергоэффективному проектированию ASHRAE ⁵
	ASHRAE 90.1 ¹	ASHRAE 90.1 ²	ASHRAE 189.1		
			1 ³	2 ⁴	
2007	128,3	–	104,5	154,8	117,9
2010	96,7	154,8	89	129,4	84,4
2013	85,3	132,7	78	114	75,8
2015	72,7	113,8	56,9	100,6	56,9
2020	56,9	75,9	40	57,5	0
2025	44,2	56,9	19,9	27,8	0
2030	31,6	50,6	0	0	0

¹ Без учета потребления электрической энергии пользователями оборудования (например, офисной техникой, кухонными комбайнами и т. д.).

² С учетом потребления электрической энергии пользователями оборудования.

³ Направлен на сокращение энергопотребления на 30 % по сравнению со стандартом 90.1–2004 (без учета потребления электрической энергии пользователями оборудования).

⁴ Направлен на сокращение энергопотребления на 30 % по сравнению со стандартом 90.1–2004 (с учетом потребления электрической энергии пользователями оборудования).

⁵ Направлен на сокращение энергопотребления на 30 % по сравнению со стандартом 90.1 на 2007–2009 гг.; 50 % – на период 2009–2011 гг.; переход к зданиям с нулевым потреблением энергии – 2013–2015 гг.

Переход к 2025 г. к теплопотреблению новых жилых зданий в размере $19,9\text{--}44,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ (США) требует разработки и производства для получения и использования максимальных размеров ВЭР от уходящих использованных теплых воздуха и воды. Это особенно важно для Республики Беларусь, где еще в 2010 г. в выработке электрической и тепловой энергии доля природного газа составляла 96 % (более 90 % его импортируется из России).

Повышение энергоэффективности жилых зданий за счет уменьшения затрат теплоты на отопление и вентиляцию – последнее звено в системе

экономии энергоресурсов. Первыми звеньями в этом процессе являются энергоэффективность получения теплоты и ее транспортирование по магистральным и наружным распределительным сетям. Благодаря оптимизации схем теплоснабжения и модернизации тепловых сетей с использованием дорогих (200–300 дол. США за 1 м), но весьма эффективных предварительно изолированных труб с 2006 по 2013 г. получена экономия 2,7 млн т у. т. Общие потери тепловой энергии в коммунальном хозяйстве Беларуси в марте 2014 г. составили 17 %, в то время как в 2001-м они были на уровне 26 %, а в 1990-м – более 30 %.

В связи с вводом в строй в 2018 г. Белорусской АЭС Минэнерго и Минстройархитектуры в настоящее время рассматривают возможность использования электричества для отопления при энергоснабжении региона АЭС.

По уровню энергопотребления жилищно-коммунального сектора (~40 %) энергобаланс Республики Беларусь примерно соответствует США, в котором жилые и коммерческие здания потребляют более 40 % ископаемых энергетических ресурсов, свыше 70 % электрической энергии и более 50 % природного газа [9]. Примерно 1/3 общих выбросов CO₂ в атмосферу США образуется за счет энергоснабжения жилых и коммерческих зданий.

Следует отметить, что в США энергетические показатели новых зданий ухудшаются на 30 % в течение первых трех-четырех лет эксплуатации [9]. Эта проблема характерна и для Беларуси. Поэтому следует уделить больше внимания процессу ввода в эксплуатацию и переналадки систем теплоснабжения в период эксплуатации.

Энергоэффективность отдельных зданий не гарантирует высокой энергоэффективности целых районов жилой застройки, так как современное жизнеобеспечение жилого здания требует использования различных энергоносителей (горячая и холодная вода, электричество, газ). Для получения и доставки этих энергоносителей с необходимыми параметрами к потребителям требуются значительные дополнительные затраты энергии, на которые необходимы дополнительные расходы валютных средств. В такой постановке проблема энергоэффективности районов жилой зоны застройки даже в европейских странах ранее не рассматривалась.

Задачами предлагаемой программы являются:

- оценка расхода энергоносителей, затрачиваемых на выработку различных видов энергии, используемой для обеспечения системы жизнеобеспечения как отдельного, так и группы зданий;
- учет потерь при получении и транспортировании различных видов энергии к потребителям.

Поставленные задачи решаются достижением технического результата посредством оценки энергоэффективности системы жизнеобеспечения внутри здания, включающего характеристики источников различных видов энергии, систем ее доставки к потребителям и внутридомового потребления различных видов энергии. Они заключаются в том, что потребление всех видов энергии (электричество, теплота, газ, вода), используемой для жизнеобеспечения здания (тепло-, газо-, электро- и водоснабжение), полу-

ченной из наружных распределительных сетей, приводит к исходному расходу топлива (т у. т) или эквивалентной ему энергии (кВт·ч), затраченной на выработку использованной энергии, которые сравнивают с действующими нормативами.

Принципиальная схема формирования энергоэффективности жилого здания приведена на рис. 1. Здесь учтены возможные поступления экологически чистой природной энергии от гелио- и ветровых установок, а также дождевой воды.



Рис. 1. Принципиальная схема формирования энергоэффективности жилого здания

Fig. 1. Principal diagram of the residential building energy performance forming

Сложность и трудность решения проблемы обеспечения энергоэффективности районов жилой застройки видна из приведенного в [10] примера аналитической модели сложного теплообмена с учетом только температурно-воздушного режима за счет отопления помещения здания. Аналитическая модель в форме системы дифференциальных уравнений приведена в [10].

Энергоэффективность здания следует рассматривать как конечный элемент общей системы энергосбережения, в которую включены магистральные и распределительные сети для доставки различных видов энергии к потребителю, а также производители всех видов потребляемой энергии. Все производители энергии (котельные, ТЭЦ, электростанции и т. п.), а также сети для доставки всех видов энергии к потребителям функциони-

руют с определенными КПД, от которых в существенной, а иногда решающей степени зависит общая энергоэффективность всей системы жизнеобеспечения жилых зданий. Здесь следует также добавить расход электроэнергии на прокачку теплоносителя в тепловых сетях и воздуха в квартирных теплообменниках-рекуператорах «воздух – воздух». Необходимо указать, что электрическая энергия вырабатывается с коэффициентом преобразования около 0,3 от топлива по сравнению с 0,8–0,9 для тепловой энергии. Кроме того, нужно учитывать расход электроэнергии на очистку, создание давления и доставку водопроводной воды. Общая схема формирования энергоэффективности группы или района зданий приведена на рис. 2.

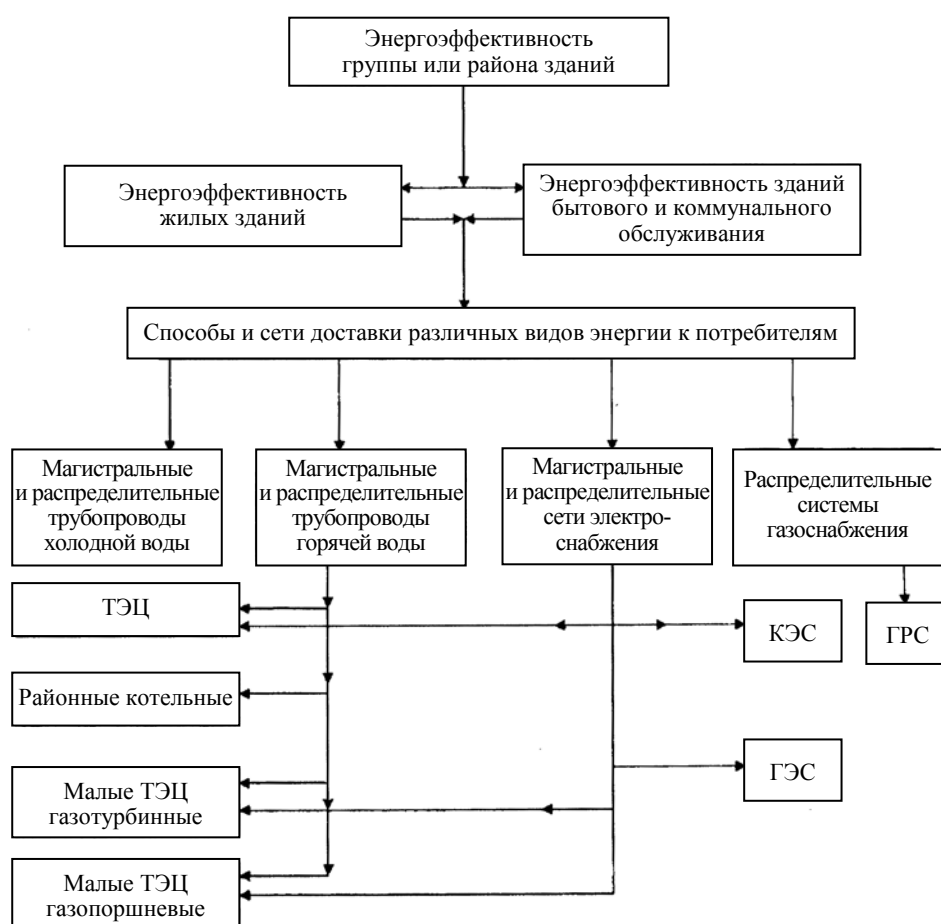


Рис. 2. Принципиальная схема формирования энергоэффективности жилого района или группы зданий

Fig. 2. Principal diagram of the residential area or a group of buildings energy performance forming

В настоящее время основным показателем эффективности расхода теплоты на отопление здания является годовой расход ($\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$), отнесенный к 1 м^2 общей площади квартиры. Этот показатель пригоден и для всех

видов энергоносителей при переводе их характеристик в соответствующую размерность. Если учесть зависимость энергоэффективности общей системы жизнеобеспечения здания от источников энергоснабжения, то в качестве показателя можно использовать килограмм условного топлива (кг у. т.), соответствующий в старых технических единицах 7000 ккал, что эквивалентно 8,14 кВт·ч. Поэтому общим показателем энергоэффективности системы жизнеобеспечения в зданиях может служить расход исходного энергоносителя, называемого топливом (в кВт·ч/(м²·год) или кг у. т./(м²·год).

Первичная оценка энергоэффективности производится отдельно по каждому из видов энергоносителей (электроэнергия, теплота, водопроводная вода, газ). В случае бытового использования природного газа, который является готовым топливом, его приготовление и доставку можно не учитывать, так как они осуществляются за пределами общей системы жизнеобеспечения рассматриваемых объектов.

Методика количественной оценки общей энергоэффективности здания основана на полном учете всех видов энергоносителей (электричество, теплота, горючий газ, вода), потребляемых из наружных распределительных сетей для нормативных условий жизнеобеспечения. Затем учитываются потери и затраты энергии на транспортировку каждого энергоносителя от источника его получения до потребителя. Последним действием является учет энергетического коэффициента преобразования энергии топлива в энергию какого-либо необходимого для жизнеобеспечения здания энергоносителя. Часто этот коэффициент преобразования называют коэффициентом полезного действия.

В целом общее количество потребляемой зданием за год (отнесенное к 1 м² общей площади) из внешних распределительных сетей энергии определяется из выражения

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (1)$$

где Q_1 – годовое потребление электрической энергии бытовыми приборами (холодильник, телевизор, освещение, электроника и т. п.), квартирными и общедомовыми побудителями расхода (квартирные и домовые вентиляторы, теплообменники-рекуператоры «воздух – воздух», насосы для обеспечения циркуляции теплоносителя в независимой системе и т. п.); Q_2 – годовое потребление электрической энергии, отнесенное к 1 м² общей площади, на отопление и горячее водоснабжение, кВт·ч/м²; Q_3 – годовое потребление электрической энергии, отнесенное к 1 м² общей площади, на холодное водоснабжение, кВт·ч/м²; Q_4 – годовое потребление энергии газа, отнесенное к 1 м² общей площади, кВт·ч/м².

Здесь необходимо отметить, что возврат любого вида энергии за счет ресурсов самого здания (бытовые тепловыделения, рекуперация теплоты отработанного воздуха, фотоэлементы для получения электричества, предварительный подогрев горячей воды теплыми стоками, использование дождевой воды и т. п.) уменьшает потребление энергии из наружных распределительных сетей. Однако в приведенном выражении совершенно не учитывается различие в расходе природных энергоресурсов, затраченных

на получение и транспортировку электричества и теплоты к потребителю, а эта разница весьма существенна. Так, коэффициент преобразования на конденсационных электростанциях или ТЭЦ, работающих в этом режиме, составляет $\alpha_{1,1} \approx 0,25-0,35$. При работе ТЭЦ в теплофикационном режиме коэффициент преобразования для теплоносителя системы централизованного теплоснабжения $\alpha_{2,1} \approx 0,90-0,95$. Самые современные парогазовые электроагрегаты имеют $\alpha_{2,1} \approx 0,35-0,40$. К ним приближаются относительно небольшие газопоршневые электроустановки, которые обладают малой тепловой инерцией, что делает их удобное использование в качестве маневровых.

Коэффициент преобразования твердого топлива в энергию теплоносителя для малых котельных составляет примерно $\alpha_{2,1} \approx 0,7-0,85$, для крупных районных котельных $\alpha_{2,2} \approx 0,85-0,90$, а для котельных, работающих на газе, $\alpha_{2,2} \approx 0,90-0,95$. Следует отметить, что современные квартирные отопители в оптимальном режиме дают коэффициент преобразования до $\alpha_{2,3} \approx 0,90$. Здесь не рассматриваются теплогенерирующие установки с $\alpha_{2,1} \geq 1,00$ за счет частичного использования высшей теплоты сгорания (конденсация водяных паров, образующихся при сгорании углеводородов).

Транспортные потери электроэнергии при доставке к потребителям составляют 2–5 %, что соответствует коэффициенту полезного действия $\beta_1 \approx 0,95-0,98$. Транспортные потери тепловой энергии при доставке потребителям по старым тепловым сетям достигали 15–20 % и соответствовали коэффициенту потерь $\beta_2 \approx 0,85-0,80$. При использовании современных предварительно изолированных труб транспортный КПД может составлять $\beta_2 \approx 0,93-0,96$ в зависимости от протяженности транспортировки.

Распределение энергопотребления в двухкомнатной квартире, потерь энергии при транспортировке и получение в наиболее используемых современных генераторах электроэнергии и теплоты приведены в табл. 2.

Транспортные потери электроэнергии для водопроводной воды при работе электроприводов насосов составляют около 1–2 кВт·ч/м³ в зависимости от дальности транспортировки [11]. В качестве примера для расчета энергопотребления примем двухкомнатную квартиру общей площадью $S = 60$ м², в которой проживают три человека, что примерно соответствует нынешней средней площади в 20 м² на одного человека.

Для расчета энергоемкости водопроводного водоснабжения принимаем суточный расход холодной воды 140 л и горячей воды 70 л, что в общем соответствует 210 л в сутки на человека и примерно равно среднему потреблению. Энергоемкость 1 м³ воды, доставленной потребителю, как правило, составляет 1–2 кВт·ч/м³. Нагревание 210 л воды в сутки для трех человек примерно до 60 °С требует затрат 14,62 кВт·ч на квартиру, или 0,2442 кВт·ч/м², что за год составляет 89 кВт·ч/м². Годовой удельный расход энергии для подачи водопроводной воды при минимальной энергоемкости в 1 кВт·ч/м³ составляет минимум 4 кВт·ч/м².

Общебытовой (освещение, холодильник, телевизор и т. п.) расход электроэнергии легко определить по показаниям электросчетчиков, установленных во всех квартирах.

Таблица 2

Распределение годового энергопотребления в двухкомнатной квартире, потерь энергии при транспортировке и получение в наиболее используемых современных генераторах электроэнергии и теплоты

Distribution of a two-room flat annual power consumption, energy losses while in transit and production of electricity and heat in most utilized modern generators

Система энергопотребления. Вид энергии и потребителя	Потребление		Доставка		Преобразование топлива						Общее энергопотребление, кВт·ч/м ²		
	Потребитель		Распределительная сеть		ТЭЦ		Газопоршневая установка		Котельная		ТЭЦ	Газопоршневая установка	Котельная
	Общее $Q_{п.и}$ кВт·ч/год	Удельное, кВт·ч/м ²	β_i	$Q_{т.и}$ кВт·ч/м ²	α_i	$Q_{т.и}$ кВт·ч/м ²	α_i	$Q_{у.и}$ кВт·ч/м ²	α_i	$Q_{у.и}$ кВт·ч/м ²			
Электричество.													
Общебытовые расходы	2160	36	0,97	1	0,3	86,1	0,35	67,2			123,1	105,2	
Принудительная вентиляция	300	5	0,97	0	0,3	11,7	0,35	9,3			16,7	14,3	
Водопроводная вода	250	4	0,97	0	0,3	9,3	0,35	7,4			13,3	11,4	
Циркуляция горячей воды	120	2	0,97	0	0,3	4,7	0,35	3,7			6,7	5,7	
Итого		47		1		112		88			160	137	
Теплота. Отопление и вентиляция		$\frac{120^*}{60}$	$\frac{0,85}{0,95}$	$\frac{21}{3}$	0,95	$\frac{6}{3}$	0,95	$\frac{6}{3}$	$\frac{0,8}{0,9}$	$\frac{30}{7}$	$\frac{147}{66}$	$\frac{147}{66}$	$\frac{171}{70}$
Горячая вода	5340	89	$\frac{0,85}{0,95}$	$\frac{16}{5}$	0,95	$\frac{5}{3}$	0,95	$\frac{5}{3}$	$\frac{0,8}{0,9}$	$\frac{22}{10}$	$\frac{100}{97}$	$\frac{100}{97}$	$\frac{127}{104}$
Итого		$\frac{209}{149}$		$\frac{37}{8}$		$\frac{11}{6}$		$\frac{11}{6}$		$\frac{52}{17}$	$\frac{257}{163}$	$\frac{257}{163}$	$\frac{298}{179}$
Природный газ. Пищеприготовление	1440	24									24	24	24
Всего		$\frac{280}{220}$		$\frac{38}{9}$		$\frac{123}{118}$		$\frac{99}{94}$		$\frac{52}{17}$	$\frac{441}{347}$	$\frac{418}{324}$	$\frac{458^{**}}{340}$

* Здесь и далее в числителе – средние годовые удельные расходы теплоты в старых зданиях и наружных тепловых сетях старого типа в хорошем техническом состоянии; в знаменателе – то же после модернизации.

** В числителе – средние годовые удельные расходы энергии до модернизации.

Оказывается, что при проживании в квартире одного человека среднемесячный расход электроэнергии составляет примерно 80 кВт·ч, двух человек – 140 кВт·ч и трех – 180 кВт·ч. Тогда среднегодовой удельный расход электроэнергии в расчетной квартире равен примерно 36 кВт·ч/м². В случае применения теплообменников-рекуператоров, оборудованных двумя вентиляторами с электродвигателями по 20 Вт, годовой удельный расход электроэнергии составляет около 5 кВт·ч/м².

Средний удельный годовой расход тепловой энергии в старых зданиях, построенных по действующим до 2000 г. техническим нормативам, – около 100–120 кВт·ч/м². При строительстве по новым техническим условиям [12] среднегодовой расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию сокращен в два раза и не должен превышать 60 кВт·ч/м².

В настоящее время среднегодовой расход природного газа на пищеприготовление по сравнению с былыми временами уменьшился примерно в два раза и составляет около 48 м³/год на одного человека, что соответствует удельному расходу энергии при наличии трех человек примерно 24 кВт·ч/м².

Потери энергии при транспортировке от источника к потребителю, отнесенные к началу распределительной сети, определяют из выражения

$$Q_{т.і} = Q_{о.і}(1/\beta_i - 1), \quad (2)$$

где $Q_{о.і}$ – количество энергии, доставленной потребителю, кВт·ч или кВт·ч/м²; β_i – коэффициент доставки энергии.

Аналогичным образом определяются потери энергии в процессе преобразования энергии топлива в необходимый вид энергии для жизнеобеспечения внутри здания

$$Q_{у.і} = Q_{п.і}(1/\alpha_i - 1), \quad (3)$$

где α_i – коэффициент преобразования энергии топлива в необходимый вид энергии.

Сумму потерь энергии на источниках преобразования, кВт·ч/м², можно рассчитать

$$Q_0 = \sum_1^n Q_{п.і} + \sum_1^n Q_{т.і} + \sum_1^n Q_{у.і} + Q_r, \quad (4)$$

где $\sum_1^n Q_{п.і}$ – сумма потребления энергии всеми видами потребителей,

кВт·ч/м²; $\sum_1^n Q_{т.і}$ – сумма транспортных потерь энергии, кВт·ч/м²;

Q_r – потребление энергии природного газа, кВт·ч/м².

В табл. 2 представлены результаты расчетов энергопотребления в упомянутой двухкомнатной квартире, потерь энергии при транспортировке и получения в наиболее используемых современных генераторах электроэнергии и теплоты. Потребление энергии природного газа для приготовления пищи учитывается отдельно вследствие его доставки без потерь системной газоснабжения. В случае использования кондиционера для охлаждения

воздуха в летнее время необходимо учитывать дополнительный расход электрической энергии. Хотя в табл. 2 приведены результаты расчетов ограниченного набора вариантов энергосбережения жилой квартиры, они позволяют сделать определенные выводы. Так, очевидно, что энергопотребление для жизнеобеспечения в старой квартире является лишь частью (~60 %) затрат природных ресурсов, доля которых для новых, так называемых энергоэффективных квартир, источников энергии и транспортных систем возрастает до 65–70 %.

ВЫВОДЫ

1. Реальная экономия энергоресурсов при нынешнем переходе к энергоэффективным зданиям пока составляет 15–20 %, что явно недостаточно и указывает на необходимость экономии природной энергии по всем направлениям. Дальнейшее уменьшение теплотребления в жилых зданиях возможно за счет использования теплоты стоков использованной воды с температурой 30–35 °С. В этом случае нагрев бытовой горячей воды делают двухступенчатым, и на первой ступени подогрева температуру холодной воды поднимают примерно на 20 °С (от 10 до 30 °С), что дает экономию в 35–40 %, или около 30–35 кВт·ч/м² (еще примерно 10 % от общего энергопотребления). В этом случае уменьшение общего энергопотребления в новых жилых энергоэффективных зданиях может достигать 25–30 %.

2. Важной проблемой является повышение экологичности жизнеобеспечения жилых зданий, что в первую очередь может реализоваться путем сбора и использования дождевой воды и ее применения для промывки туалетов. В этом случае расход чистой водопроводной воды можно сократить на 30–40 % и соответственно уменьшить расход энергии на очистку и перекачку.

3. Использование крыш жилых зданий для получения электроэнергии за счет солнца и ветра пока не представляется экономически целесообразным.

4. Применение тепловых насосов может оказаться экономически оправданным в отдельных случаях при отсутствии вблизи магистрального и необходимой сети распределительных газопроводов.

5. В принятое в последнее время понятие «пассивный дом», который в среднегодовом исчислении не потребляет энергии извне, необходимо включить учет всех видов потребляемой энергии. При этом ведущую роль должны играть экономические факторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чистович, С. А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления / С. А. Чистович. М.: Стройиздат, 1975. 342 с.
2. Зингер, Н. М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н. М. Зингер. М.: Энергия, 1976. 314 с.
3. Хрилев, Л. С. Оптимизация систем теплофикации и централизованного теплоснабжения / Л. С. Хрилев, Н. А. Смирнов. М.: Энергия, 1978. 284 с.
4. Великанов, В. П. Экономия тепловой энергии в системах теплоснабжения / В. П. Великанов // Исследование опытных пофасадно-автоматизированных систем отопления: сб. ст. М.: АКХ имени Панфилова, 1984. С. 18–28.

5. Богуславский, Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / Л. Д. Богуславский. М.: Стройиздат, 1982. 264 с.
6. Сеннова, Е. В. Об оптимальном проектировании развиваемых и реконструируемых теплоснабжающих систем / Е. В. Сеннова, В. А. Стенников // Теплоэнергетика. 1984. № 9. С. 26–30.
7. Разработка критериев для определения очередности и эффективности автоматизации систем теплопотребления: отчет / науч. рук. С. Н. Осипов. Минск, 1983–1985.
8. Оптимизация схем энергоснабжения жилых территорий городских поселений с учетом экономии энергии и планировочных решений. Минск: Полымя, 1986. 25 с.
9. Laustsen, J. Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings / J. Laustsen // JEA Information Paper. Paris: International Energy Agency, 2008. 88 p.
10. Пилипенко, В. М. Комплексная реконструкция индустриальной жилой застройки / В. М. Пилипенко. Минск: Адукацыя і выхаванне, 2007. 200 с.
11. Осипов, С. Н. Особенности проектирования систем теплоснабжения при переходе к рыночной экономике / С. Н. Осипов // Эффективные методы проектирования, строительства и эксплуатации систем теплоснабжения: сб. М., 1990. С. 33–37.
12. Миненков, А. В. Республиканская программа энергоснабжения на 2011–2015 гг. / А. В. Миненков // Энергоэффективное строительство в Республике Беларусь: современные технологии энергосбережения: информационные матер. III Междунар. конф., Минск, 2 марта 2011 г. Минск, 2011. С. 1–5.

Поступила 23.06.2015 Подписана в печать 01.09.2015 Опубликовано онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Chistovich S. A. (1975) *Automatic Regulation of Chargeable Heat in the Heat Supply and Heating Systems*. Moscow, Sroyzdat. 342 p. (in Russian).
2. Zinger N. M. (1976) *Hydraulic and Heating Conditions of the Heating Systems*. Moscow, Energy. 314 p. (in Russian).
3. Khrilev L. S., Smirnov N. A. (1978) *Optimizing Cogeneration and District Heat Supply Systems*. Moscow, Energy. 284 p. (in Russian).
4. Velikanov V. P. (1984) Heat Energy Saving in the Heat Supply Systems. *Investigation of the Heat Supply Per-Façade Automated Prototype Systems. Collection of Papers*. Moscow, Academy of Municipal Economy named after Panfilova, 18–28 (in Russian).
5. Boguslavskiy L. D. (1982) *Lowering Energy Consumption in Operation of the Heating, Ventilation and Air Conditioning Systems*. Moscow, Sroyzdat. 264 p. (in Russian).
6. Sennova Ye. V., Stennikov V. A. (1984) On Optimal Project Engineering of Developing and Reconstructed Heat-Supplying Systems. *Teploenergetika* [Heat Engineering], (9), 26–30 (in Russian).
7. Osipov S. N. (1985) *Elaborating Criteria for Determining the Order of Priority and Effectiveness of the Heat-Consumption Systems Automation. Report on Research Work*. Minsk. (in Russian, unpublished).
8. *Optimizing Energy-Supply Schemes of the Urban Locality Residential Areas with Due Consideration of Energy Saving and Planning Concepts*. Minsk, Polymya, 1986. 25 p. (in Russian).
9. Laustsen J. Editor (2008) *Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings*. JEA Information Paper. Paris, International Energy Agency. 88 p.
10. Pilipenko V. M. (2007) *Comprehensive Reconstruction of the Industrial Residential Development*. Minsk, Adukatsyia i Vykhaveanne. 200 p. (in Russian)
11. Osipov S. N. (1990) Design Peculiarities of the Heat Supply Systems During Transition to Market Economy. *Effective Methods of Design, Construction and Operation of the Heat Supply Systems. Collection*. Moscow, 33–37 (in Russian).
12. Minenkov A. V. (2011) The Republican Programme of Power Service for 2011–2015. *Energoeffektivnoe Stroitelstvo v Respublike Belarus: Sovremennye Tekhnologii Energoberezeniia. Informatsionnye Mater. III Mezhdunar. Konf.* [Energy-Efficient Construction in the Republic of Belarus: Modern Technologies of Energy Saving. Information Materials of III International Conference]. Minsk, 1–5 (in Russian).

Received: 23.06.2015

Accepted: 01.09.2015

Published online: 03.06.2016