

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 61, № 2
2018

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Бладыко Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой	97
Ломан М. С., Каченя В. С. Определение повреждения токовых цепей дифференциальной токовой защиты	108
Менжинский А. Б., Малашин А. Н., Суходолов Ю. В. Разработка и анализ математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением	118
Анненков А. Н., Сизиков С. В., Шиянов А. И. Асинхронный двигатель с перфорированным полым ротором	129

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Осипов С. Н., Захаренко А. В., Данилевский С. А. Некоторые особенности энергопотребления в современных жилых зданиях	141
Иокова И. Л., Тарасевич Е. Н. Исследование возможности применения вихревого теплогенератора в системах теплоснабжения жилых, промышленных и общественных зданий	159
Лазарев В. С., Юрик И. В. Некоторые «экзотические» источники, выявленные в ходе отбора серийных изданий, в помощь исследованиям по энергобезопасности и энергосбережению, энергоэффективным технологиям и технике: рекомендуемое дополнение к «кругу чтения» специалиста-энергетика	167
Пантелей Н. В. Оценка состояния и анализ повреждаемости трубопроводов тепловых сетей	179

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

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

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

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

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

Подписано к печати 29.03.2018. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2018. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 61, No 2
2018

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:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Bladyko Y. V. Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load	97
Loman M. S., Kachenya V. S. Detection of Current Circuits Fault for Differential Current Protection	108
Menzhinski A. B., Malashin A. N., Suhodolov Yu. V. Developing and the Analysis of Mathematical Models of Generators of Linear and Reciprocating Types with Electromagnetic Excitation	118
Annenkov A. N., Sizikov S. V., Shiyanov A. I. Asynchronous Motor with a Hollow Perforated Rotor	129

HEAT POWER ENGINEERING

Osipov S. N., Zakharenko A. V., Danilevskii S. A. Some Specific Features of Energy Consumption in Modern Residential Buildings	141
Iokova I. L., Tarasevich E. N. Investigation of the Possibility of Using a Vortex Heat Generator in Heat Supply Systems for Residential, Industrial and Public Buildings	159
Lazarev V. S., Yurik I. V. Some "Exotic" Information Sources that Have Been Discovered during the Selection of Serial Publications to Support Research in Energy Security, Energy Conservation and Energy Efficiency Technologies and Techniques: Advantageous Addition for "Professional Reading" of a Power Engineering Expert	167
Panteley N. V. Assessment of the State and Analysis of Damageability of Heating Grids Pipelines	179

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

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

Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

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

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

Passed for printing 29.03.2018. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2018. Order list .

ADDRESS

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

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

© Belarusian National Technical University, 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107

УДК 621.315.176

Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой

Ю. В. Бладыко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств и воздушных линий является определение стрел провеса и тяжений в различных режимах климатических воздействий. Провод с равномерно распределенной нагрузкой рассматривается как однородная гибкая нить, имеющая очертание параболы. Сосредоточенные нагрузки от распорок, заградительных шаров, шлейфов, отпаяк к электрическим аппаратам и других элементов заменяются распределенной по пролету. На примере пролета без натяжных гирлянд изоляторов рассматривается действие на провод сосредоточенных нагрузок, определяется погрешность при замене сосредоточенных сил равномерно распределенной вдоль пролета нагрузкой. Стрела провеса для эквивалентного провода определяется с помощью коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил. Составлено уравнение состояния, которое позволяет определить тяжение после изменения числа сосредоточенных нагрузок, например после установки распорок, подвешивания заградительных шаров, крепления отпаяк. Приведена зависимость максимальной стрелы провеса от числа сосредоточенных сил. Дано определение коэффициенту сосредоточенных сил как отношению суммы сосредоточенных нагрузок к весу провода в пролете. Установлена связь между коэффициентами нагрузки, увеличения стрелы провеса и коэффициентом сосредоточенных сил. Выведены формулы определения погрешности замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета как функции от числа сосредоточенных сил и коэффициента сосредоточенных сил. Показано уменьшение погрешности при увеличении числа сосредоточенных сил. Более точный расчет механических напряжений и стрел провеса возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки распределительных устройств и проводов воздушных линий, где положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, гибкая нить, цепная линия, парабола, уравнение состояния, пролет, эквивалентный провод, коэффициент нагрузки

Для цитирования: Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 97–107. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107

Адрес для переписки

Бладыко Юрий Витальевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-93
eie@bntu.by

Address for correspondence

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

Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load

Y. V. Bladyko¹⁾

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

Abstract. The objective of mechanical calculation of flexible wires of substations and overhead lines is to determine the sag and tension in different climatic conditions. A wire with a uniformly distributed load is considered as a homogeneous flexible thread having the form of a parabola. Concentrated loads from spacers, barrier balls, stubs, taps to electrical apparatus and other elements are replaced with the one distributed over the span. On behalf of a span without tension springs of insulators the action of concentrated loads on the wire is considered, an error is determined when replacing the concentrated forces with the one uniformly distributed along the span by the load. The sag for the equivalent wire is determined with the aid of the ratio of the increase of the sag, due to the presence of concentrated forces. An equation of state has been drawn up which makes it possible to determine the tension after changing the number of concentrated loads, e.g., after installing spacers, hanging the barrier balls, fixing the taps. The dependence of the maximum sag on the number of concentrated forces is given. The definition of the coefficient of concentrated forces as the ratio of the sum of the concentrated loads to the weight of the wire in the span is presented. A relationship between the load factors, the increase of the sag and the coefficient of concentrated forces is established. The formula has been deduced for determining the error in the replacement of concentrated forces by a uniformly distributed load along the span as a function of the number of concentrated forces and the coefficient of concentrated forces. A decrease in the error with an increase in the number of concentrated forces has been demonstrated. A more accurate calculation of mechanical tensions and sag is possible with the use of a vector-parametric method for calculating the flexible busbar of substations and air-line wires, where the design model of wires in the form of a flexible elastic thread is placed, taking into account the spatial disposition of all structural elements.

Keywords: sag, tension, flexible thread, chain line, parabola, equation of state, span, equivalent wire, load factor

For citation: Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 97–107. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107 (in Russian)

Задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) является определение стрел провеса и тяжений в различных режимах климатических воздействий. Актуальная проблема современной электроэнергетики – проектирование РУ с уменьшенными габаритами и компактных ВЛ, что повышает требования к их расчету, обеспечению в любой точке пролета необходимых по ПУЭ минимальных расстояний до различных объектов при всех возможных видах нагрузок, принятых при проектировании (гололед, ветер и др.). В механическом расчете гибких проводов сосредоточенные нагрузки от распорок, заградительных шаров, гирлянд изоляторов, шлейфов, отпаек к электрическим аппаратам и других элементов заменяются распределенной по пролету [1]. Цель статьи – определение погрешности такой замены.

В приближенных методах провод с равномерно распределенной нагрузкой обычно рассматривается как однородная гибкая нить, имеющая очертание параболы. Расчет такой нити производится по уравнению состояния, вывод которого основан на сравнении длин нити при различных климатических условиях и разном нагружении [1].

Провод с несколькими различными видами нагрузок должен рассматриваться как комбинированная, т. е. неоднородная гибкая нить, не имеющая плавного очертания параболы по всей длине пролета. Плавность очертания нарушается в местах примыкания равномерно распределенных нагрузок разной интенсивности и в местах приложения сосредоточенных сил. Еще более сложное очертание кривой провисания провода получается при одновременном действии различных нагрузок в двух взаимно перпендикулярных направлениях – вертикальном и поперечном горизонтальном. В таких случаях длина неоднородной нити должна определяться как сумма длин отдельных участков, на которых сохраняется очертание параболы (или условно сохраняется, например, при нагрузке от действия ветра).

В методике [1] уравнение состояния провода не отличается по структуре от обычного уравнения состояния, по которому рассчитываются провода ВЛ с равномерно распределенными нагрузками. Но для того чтобы уравнение было применимо для неоднородной нити, ее заменяют приведенной (эквивалентной) однородной нитью, что достигается путем введения приведенной (эквивалентной) равномерно распределенной по длине пролета нагрузки. Приведенная нагрузка определяется из условия равенства длины однородной нити с равномерно распределенной приведенной нагрузкой длине комбинированной нити с распределенными нагрузками разной интенсивности и в общем случае также длине нити с сосредоточенными нагрузками разной величины, приложенными в различных местах пролета.

Длина неоднородной (комбинированной) нити определяется путем интегрирования дифференциального уравнения нити по участкам. Для перехода от неоднородной нити к эквивалентной однородной при любой схеме загрузки пролета определяется переходный коэффициент K , называемый коэффициентом нагрузки. Приведенная нагрузка вычисляется как произведение величин равномерно распределенной нагрузки для данного провода и коэффициента нагрузки.

В большинстве случаев трудоемкого непосредственного интегрирования по участкам можно воспользоваться приемом перемножения эпюр «балочных» поперечных сил – приемом Верещагина [2]. Могут быть использованы и другие приближенные способы [3, 4].

В статье на примере пролета без натяжных гирлянд изоляторов рассматривается действие на провод сосредоточенных нагрузок, определяется погрешность при замене сосредоточенных сил равномерно распределенной вдоль пролета нагрузкой.

Гибкая однородная нерастяжимая тяжелая нить с закрепленными концами в однородном гравитационном поле принимает форму цепной линии [5].

По уравнению цепной линии стрела провеса в середине пролета

$$f_0 = a \left[\operatorname{ch} \left(\frac{l}{2a} \right) - 1 \right],$$

где $a = H/q$; l – длина пролета; H – тяжение в проводе (горизонтальная составляющая); q – погонный вес провода.

Длина провода

$$L = 2a \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{l}{2a} \right).$$

Практически тот же результат дает сумма разложения гиперболической функции в степенной ряд (ряд Маклорена)

$$f_0 = \frac{l^2}{2^2 \cdot 2! \cdot a} + \frac{l^4}{2^4 \cdot 4! \cdot a^3} + \dots = \frac{ql^2}{8H} + \frac{q^3 l^4}{384H^3} + \dots$$

при длине провода

$$L = l + \frac{l^3}{2^2 \cdot 3! \cdot a^2} + \frac{l^5}{2^4 \cdot 5! \cdot a^4} + \dots = l + \frac{q^2 l^3}{24H^2} + \frac{q^4 l^5}{1920H^4} + \dots$$

Учитывая, что для встречающихся на практике случаев $2a \gg l$, пользуются только первым слагаемым, соответствующим представлению провода параболой [1]:

$$f_0 = \frac{ql^2}{8H},$$

что дает погрешность порядка 0,2 %.

Длина провода определяется при этом как

$$L = l + \frac{q^2 l^3}{24H^2}.$$

Стрела провеса для эквивалентного провода

$$f_0 = \frac{ql^2 K_f}{8H},$$

где K_f – коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием сосредоточенных сил, гирлянд изоляторов, распорок, заградительных шаров, отпаяк.

Длина эквивалентного провода

$$L = l + \frac{q^2 l^3 K^2}{24H^2},$$

где K – коэффициент нагрузки.

Расчетная модель пролета показана на рис. 1а.

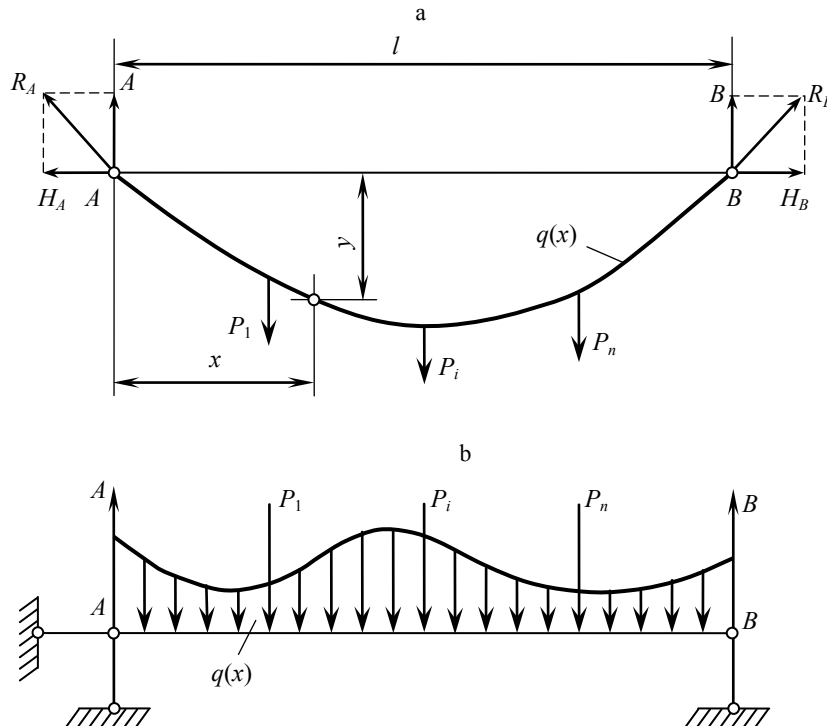


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – провод с вертикальными нагрузками, распределенными $q(x)$ и сосредоточенными P_i ; б – провод в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, загруженной так же, как и провод

Fig. 1. Estimated span scheme: а – wire with vertical distributed loads $q(x)$ and concentrated loads P_i ; б – wire in the form of a simple split beam with hinged supports, loaded in the same way as the wire

Вертикальные реакции A и B (рис. 1б) можно назвать балочными реакциями, как это принято, например, при определении вертикальных реакций трехшарнирной арки или вантовых систем [5].

Составим уравнение моментов относительно какого-нибудь произвольно выбранного сечения провода с координатами x и y от всех внешних сил, расположенных слева от этого сечения. Учитывая, что изгибающий момент в любом сечении провода (как гибкой нити) равен нулю, получим [1]

$$\sum M = Ax - \sum M_q - \sum M_P - Hy = 0,$$

где A – опорная балочная реакция; x , y – координаты провода; $\sum M_q$ – сумма моментов распределенных нагрузок; $\sum M_P$ – сумма моментов сосредоточенных сил.

Алгебраическая сумма моментов вертикальных сил, входящих в это равенство, численно равна изгибающему моменту, который возник бы в простой однопролетной балке с шарнирными опорами, загруженной так же,

как провод. Обозначая этот балочный изгибающий момент через $M(x)$, получим

$$y = \frac{M(x)}{H}. \quad (1)$$

Так как $M(x)$ есть переменная величина балочного изгибающего момента в зависимости от абсциссы x , то по формуле (1) может быть определена стрела провеса в любом месте пролета.

В середине пролета $x = l/2$, и максимальная стрела провеса $f_0 = y = M(l/2)/H$.

Приведенная (эквивалентная) нагрузка $\hat{q} = qK$.

Напряжение в проводе $\sigma = H/F$, где F – площадь сечения провода.

Определив для всех режимов эквивалентные погонные $\hat{q}$ и удельные $\hat{\gamma} = \hat{q}/F$ нагрузки, составляется уравнение состояния. При этом следует учитывать упругое и температурное удлинения провода на длине l_1 . Тогда получим разность длин провода в двух режимах, из которых один исходный (с индексом 0):

$$\Delta L = \frac{\hat{\gamma}^2 l^2 l_1}{24\sigma^2} - \frac{\hat{\gamma}_0^2 l^2 l_1}{24\sigma_0^2} = \frac{l_1}{E} (\sigma - \sigma_0) + \alpha l_1 (t - t_0),$$

откуда

$$\sigma - \frac{\hat{\gamma}^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\hat{\gamma}_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0), \quad (2)$$

где $\hat{\gamma} = \gamma K$; $\hat{\gamma}_0 = \gamma_0 K_0$; E – модуль упругости провода; α – коэффициент температурного удлинения провода; t – температура провода.

При неизменной температуре $t = t_0 = \text{const}$ уравнение состояния (2) можно записать в виде

$$H - \frac{q^2 l^2 E F K^2}{24 H^2} = H_0 - \frac{q_0^2 l^2 E F K_0^2}{24 H_0^2}.$$

Уравнение состояния позволяет определить тяжение после изменения числа сосредоточенных нагрузок, например после установки распорок, подвешивания заградительных шаров, крепления отпаяк.

Коэффициент нагрузки при отсутствии натяжных гирлянд изоляторов и одинаковых высотах подвеса проводов на опорах [1]

$$K^2 = 1 + 12 \left\{ \frac{1}{Q l^2} \sum_1^n P_i a_i b_i + \frac{1}{Q^2 l^2} \left[\sum_1^n P_i^2 a_i b_i + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \left(P_1 a_1 \sum_2^n P_i b_i + P_2 a_2 \sum_3^n P_i b_i + \dots + P_{n-2} a_{n-2} \sum_{n-1}^n P_i b_i + P_{n-1} a_{n-1} P_n b_n \right) \right] \right\},$$

где $Q = ql$ – вес провода в пролете без учета провиса; $a_i = li/(n+1)$ – расстояние до опоры A i -й сосредоточенной силы при их равномерной расстановке вдоль пролета; $b_i = l - a_i = l(n+1-i)/(n+1)$ – расстояние до опоры B i -й сосредоточенной силы; $P_i = P/n$ – вес i -й сосредоточенной нагрузки; P – суммарный вес всех сосредоточенных нагрузок; n – число сосредоточенных сил в пролете.

После подстановки получим

$$K^2(n) = 1 + 2 \frac{n+2}{n+1} K_P + \frac{n+2}{n} K_P^2,$$

где $K_P = P/Q$ – коэффициент сосредоточенных сил.

При большом числе сосредоточенных сил коэффициент нагрузки

$$K = \lim_{n \rightarrow \infty} K(n) = 1 + K_P. \quad (3)$$

После расчета опорных балочных реакций

$$A = B = (Q + P)/2 = Q(1 + K_P)/2$$

по (1) можно определить максимальную стрелу провеса

$$f_0(n) = \frac{1}{H} \left[\frac{ql^2}{8} + \frac{Pl}{4} - \frac{Pl}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{i}{n+1} \right) \right].$$

После упрощения получим

$$f_0(n) = \frac{ql^2 K_f(n)}{8H}, \quad (4)$$

где

$$K_f(n) = 1 + K_P \left(1 + \frac{1}{n} \right).$$

При $n \rightarrow \infty$ провод можно считать загруженным распределенной нагрузкой $q + P/l = q(1 + K_P)$, т. е. коэффициент нагрузки $K = K_f(\infty) = 1 + K_P$, что подтверждает ранее полученное выражение (3).

При разных высотах точек подвеса провода стрелы провеса определяются тем же путем, что и при одинаковой высоте точек подвеса, так как формула балочных реакций в обоих случаях имеет одинаковую структуру, причем вес провода может быть принят с учетом уклона.

При совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок стрелы провеса и горизонтальные отклонения находят независимо в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по формуле (1).

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета ВЛ $l = 400$ м; провод 264/34 АCSR с погонным весом $q = 0,98$ даН/м,

площадью поперечного сечения $F = 297,8 \text{ мм}^2$, модулем упругости $E = 7400 \text{ даН/мм}^2$; тяжение $H = 1608 \text{ даН}$; суммарный вес сосредоточенных нагрузок в пролете $P = 35 \text{ даН}$. Рассматривался пролет без натяжных гирлянд изоляторов, с одинаковыми высотами подвеса, без ветра и гололеда, с неизменным тяжением. Для РУ длина пролета $l = 40 \text{ м}$. Зависимость максимальной стрелы провеса пролета ВЛ от числа сосредоточенных сил приведена на рис. 2, то же для пролета РУ – на рис. 3.

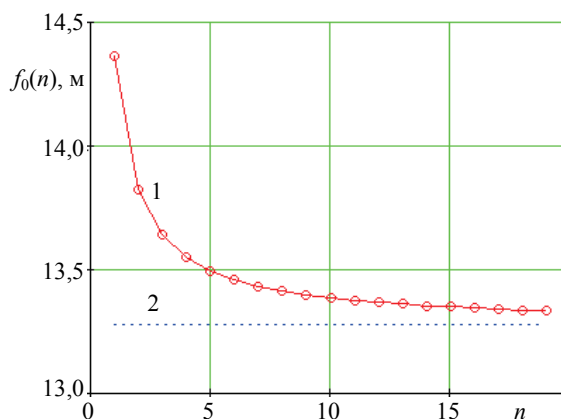


Рис. 2. Зависимость стрелы провеса пролета воздушной линии от числа сосредоточенных сил: 1 – расчет по формуле (4); 2 – стрела провеса эквивалентного провода

Fig. 2. Dependence of the boom of the sag of overhead line span sag on the number of concentrated forces: 1 – calculation by the formula (4); 2 – boom of the sag of the equivalent cable

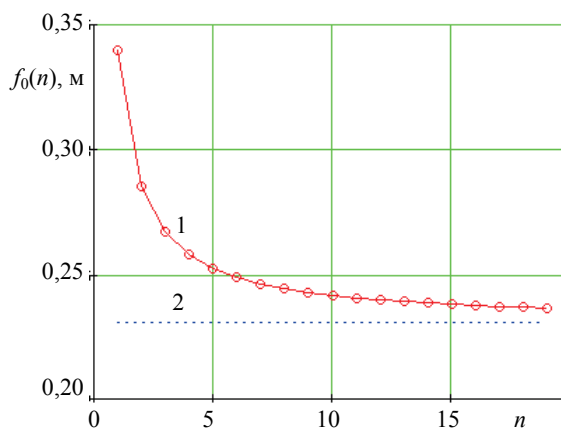


Рис. 3. Зависимость стрелы провеса пролета распределительного устройства от числа сосредоточенных сил: 1 – расчет по формуле (4); 2 – стрела провеса эквивалентного провода

Fig. 3. Dependence of the boom of the sag span of the switchgear on the number of concentrated forces: 1 – calculation by the formula (4); 2 – boom of the sag of the equivalent cable

Как видно из рис. 2, наибольшая абсолютная погрешность при $n = 1$ составляет около одного метра, что не позволительно для проектирования.

Для частного случая, когда в середине пролета действует одна сосредоточенная сила, стрела провеса

$$f_0 = \frac{1}{H} \left[\frac{ql + P}{2} \cdot \frac{l}{2} - \frac{ql^2}{8} \right] = \frac{ql^2 K_f}{8H},$$

где

$$K_f = 1 + 2K_p.$$

Коэффициент нагрузки при одной сосредоточенной силе в середине пролета определяется по формуле

$$K^2 = 1 + 3\frac{P}{ql} + 3\left(\frac{P}{ql}\right)^2 = 1 + 3K_p(1 + K_p).$$

Относительная погрешность от замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета

$$\delta_f = \frac{f_0(\infty) - f_0(n)}{f_0(n)} = \frac{\frac{ql^2(1 + K_p)}{8H} - \frac{ql^2 K_f(n)}{8H}}{\frac{ql^2 K_f(n)}{8H}} = -\frac{1}{1 + n \left(1 + \frac{1}{K_p}\right)}. \quad (5)$$

Как следует из рис. 2, погрешность от замены $n = 1$ сосредоточенной силы равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета ВЛ составляет 7,5 %, при $n = 3$ – до 2,7 %, при $n = 5$ – до 1,6 %, при $n = 7$ – до 1,2 %. Для пролета РУ (рис. 3) при $n = 1$ погрешность возрастает до 32 %. Таким образом, самые большие погрешности замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой будут при их малом числе. Выражение (5) позволяет оценить погрешность при любом числе сосредоточенных сил n и коэффициенте K_p .

При наличии натяжных гирлянд изоляторов, а также при учете ветровой нагрузки погрешность возрастает из-за искажения формы системы «гирлянды изоляторов – провод», отклонения составляющих проходят в разных плоскостях. В [6] показано увеличение погрешности с ростом длины гирлянды изоляторов. Наличие отпаек требует учета их реального расположения в РУ. Методика [1] может быть распространена на пролеты с гирляндами изоляторов, заградительными шарами, ветром, гололедом. Однако погрешность замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой возрастает.

Более точный расчет механических напряжений возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки РУ и проводов ВЛ, где положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити [6–8].

Дифференциальные уравнения второго порядка, описывающие статику гибкой упругой нити [6], являются нелинейными. Их численное решение производится разностным методом с помощью ЭВМ [8–10]. Система конечно-разностных уравнений решается на основе вложенных друг в друга итераций: относительно координат, тяжения или длины провода. При наличии сосредоточенных нагрузок в виде ответвлений к электрическим аппаратам добавляется еще одна итерация по координатам точек их крепления к гибким шинам РУ. Эти координаты являются функцией тяжения в отпайке, а оно в свою очередь зависит от положения провода. Произвольное расположение отпайек дает составляющие сосредоточенных сил, действующие во всех направлениях. Как показано в [6], расхождение результатов по [1] можно снизить при более точном задании этих составляющих. Разработанная программа позволяет учесть до трех отпайек, до двух шлейфов и гирлянд изоляторов, в то время как методика [1] дает при малом числе сосредоточенных нагрузок наибольшую погрешность.

ВЫВОДЫ

1. Дано определение коэффициенту сосредоточенных сил K_p как отношению суммы сосредоточенных нагрузок к весу провода в пролете.
2. Установлена связь между коэффициентом нагрузки K и коэффициентом сосредоточенных сил K_p .
3. Установлена связь между коэффициентом увеличения стрелы провеса K_f , обусловленным наличием сосредоточенных нагрузок, и коэффициентом сосредоточенных сил K_p .
4. Выведены формулы определения погрешности замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета как функции от числа сосредоточенных сил n и коэффициента сосредоточенных сил K_p . Показано уменьшение погрешности при увеличении числа сосредоточенных сил n .
5. Более точный расчет механических напряжений и стрел провеса возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки распределительных устройств и проводов воздушных линий, где положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
2. Качурин, В. К. Гибкие нити с малыми стрелками / В. К. Качурин. М.: Гостехиздат, 1956. 224 с.
3. Розанов, Г. Н. Некоторые вопросы расчета механической части воздушных линий / Г. Н. Розанов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. 224 с.
4. Тер-Мкртчян, Л. Н. Механический расчет проводов для открытых подстанций / Л. Н. Тер-Мкртчян // Электричество. 1935. № 4. С. 35–45.

5. Глазунов, А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. Т. 1: Работа и расчет проводов и тросов / А. А. Глазунов. М; Л.: Госэнергоиздат, 1956. 192 с.
6. Стрелюк, М. И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
7. Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И. И. Сергей [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 38–44.
8. Стрелюк, М. И. Расчет на ЭВМ статики гибкой ошиновки РУ / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Научные и прикладные проблемы энергетики: межвед. сб. Вып. 12. Минск: Вышэйш. шк., 1985. С. 75–79.
9. Стрелюк, М. И. Программа механического расчета гибкой ошиновки РУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Инв. № ГосФАП – П007594, инв. № РФАП БССР – 00143. Минск, 1984. 12 с.
10. Стрелюк, М. И. Численный метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1995. № 3–4. С. 21–29.

Поступила 28.11.2017 Подписана в печать 05.02.2018 Опубликовано онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Boshnyakov A. D. (1975) *Calculation of the Wires of Substations and of Large Transitions of Transmission Lines*. Leningrad, Energia Publ. 248 (in Russian).
2. Kachurin V. K. (1956) *Flexible Threads with Small Sags*. Moscow, Gostekhizdat Publ. 224 (in Russian).
3. Rozanov G. N. (1954) *Some Issues of Calculating the Mechanical Part of Air Lines*. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 224 (in Russian).
4. Ter-Mkrtchan L. N. (1935) Mechanical Calculation of Wires for Open Substations. *Elektrichestvo [Electricity]*, (4), 35–45 (in Russian).
5. Glazunov A. A. (1956) *Fundamentals of the Mechanical Part of Overhead Transmission Lines. Vol. I. Work and Calculation of Wires and Cables*. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 192 (in Russian).
6. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars in Various Modes of Climatic Influences. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions]*, (8), 8–14 (in Russian).
7. Sergey I. I., Bladyko Y. V., Panamarenka Y. G., Tsemekhman B. D., Tarasov V. E. (2012) Analysis of the Effect of Ice-Wind and Electrodynamical Loads in Spans with Arbitrary Arrangement of Wires. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 38–44 (in Russian).
8. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Yu. V. (1985) Calculation on the Computer of Statics of a Flexible Busbars of the Switchgear. *Scientific and Applied Problems of Power Engineering*. Minsk, Vysheishaya Shkola [Higher School] Publ., (12), 75–79 (in Russian).
9. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Yu. V. (1984) *Program of Mechanical Calculation of the Flexible Busbars of the Switchgear in Various Types of Climatic Influences*. Accession Number GosFAP – P007594, Accession Number of RFAP of the BSSR – 00143. Minsk. 12 (in Russian).
10. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Plants of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions]*, (3–4), 21–29 (in Russian).

Received: 28 November 2017 Accepted: 5 February 2018 Published online: 30 March 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-108-117

УДК 621.316.925

Определение повреждения токовых цепей дифференциальной токовой защиты

М. С. Ломан¹⁾, В. С. Каченя¹⁾

¹⁾ОАО «Белэлектромонтажналадка» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Ложная работа дифференциальной токовой защиты приводит к отключению наиболее ответственных электроэнергетических объектов. Повреждение вторичных цепей трансформаторов тока является одной из наиболее частых причин ложной работы защиты. Своевременное определение данной неисправности повышает надежность работы дифференциальной токовой защиты и уменьшает количество ложных отключений. В статье рассмотрены способы определения обрыва вторичных токовых цепей для дифференциальной защиты. Часть способов мгновенно реагирует на неисправность вторичных токовых цепей, а другая часть идентифицирует повреждение по истечении определенной выдержки времени. Каждый из рассмотренных способов обладает своими преимуществами и недостатками. Предложен новый метод определения обрыва вторичных токовых цепей на основе анализа приращений действующих значений дифференциального и тормозного токов. При этом приращения вычисляются за половину периода промышленной частоты, что обеспечивает быстрое определение неисправности. Использование суммы и разности приращений тормозного и дифференциального токов позволяет с наибольшей чувствительностью определить обрыв токовых цепей. Метод может быть адаптирован для работы с любым типом дифференциальной защиты, в том числе с защитой трансформатора. Оценка приращения действующего значения тока выполняется с учетом переходного процесса в фильтре Фурье. С помощью вычислительного эксперимента установлен предел погрешности такой оценки. Представлена блок-схема алгоритма определения обрыва токовых цепей на основании анализа приращений действующих значений тормозного и дифференциального токов, описан принцип его функционирования. Произведено определение параметров срабатывания. Установлены пределы чувствительности способа. Методом вычислительного эксперимента с использованием среды моделирования MatLab Simulink определены временные характеристики алгоритма.

Ключевые слова: вторичные токовые цепи, обрыв, дифференциальная токовая защита, синусоидальный сигнал, уставка срабатывания

Для цитирования: Ломан, М. С. Определение повреждения токовых цепей дифференциальной токовой защиты / М. С. Ломан, В. С. Каченя // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 108–117. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-108-117

Адрес для переписки

Каченя Владислав Станиславович
ОАО «Белэлектромонтажналадка»
ул. Плеханова, 105а
220101, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-09-05
v.s.kachenya@gmail.com

Address for correspondence

Kachenya Vladislav S.
JSC “Belektromontazhnaladka”
105a Plekhanov str.,
220101, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-09-05
v.s.kachenya@gmail.com

Detection of Current Circuits Fault for Differential Current Protection

M. S. Loman¹⁾, V. S. Kachenya¹⁾

¹⁾JSC “Belektromontazhnaladka” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. False operation of the differential current protection leads to tripping of the most important electrical power objects. Fault of current transformer’s secondary circuits is one of the most often cause of false operation of the differential current protection. Early determination of this malfunction increases the reliability of the differential current protection and reduces the number of false trips. In the present article the methods of secondary open circuit determining for the differential protection are described. Some of the methods react instantly to the malfunction of secondary current circuits, and the other part identifies fault after a certain time delay. Each of considered methods has its advantages and disadvantages. A new method for determination secondary open current circuits based on the analysis of increments of the RMS values of differential and braking currents has been proposed. In this case, increments are calculated for half the period of the industrial frequency, which provides quick fault determining. The use of the sum and the difference between the increments of the brake and differential currents makes it possible to determine the open circuits in the most sensitive way. The method can be adapted to work with any type of differential protection, including transformer protection. The evaluation of the increment of the RMS current value is performed taking into account the transient process in the Fourier filter. With the aid of a computational experiment, the error limit of such an estimate is determined. The block diagram of algorithm of determination of open circuits on the basis of the analysis of increments of the acting values of brake and differential currents is presented; the principle of its functioning is described. The parameters of operation are determined. The limits of sensitivity of the method are determined, too. The time characteristics of the algorithm have been determined by the method of computational experiment with the of the MatLab Simulink simulation environment.

Keywords: secondary current circuits, open circuit, current differential protection, sinusoidal signal, setpoint actuation

For citation: Loman M. S., Kachenya V. S. (2018) Detection of Current Circuits Fault for Differential Current Protection. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 108–117. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-108-117 (in Russian)

Введение

Дифференциальные токовые защиты (ДТЗ) применяются для защиты от коротких замыканий (КЗ) наиболее ответственных электроэнергетических объектов. Они обеспечивают абсолютную селективность и действуют на ликвидацию аварии без выдержек времени [1]. Для определения повреждения устройства данного типа используют величины дифференциального и тормозного токов, рассчитываемые на основании вторичных токов трансформаторов тока (ТТ) [2, 3]. При неисправности токовых цепей одного из присоединений защита должна быть выведена из работы.

Для терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА), в которых значение тормозного тока рассчитывается как сумма токов присоединений, обрыв вторичных цепей ТТ сопровождается уменьшением тормозного и увеличением дифференциального тока. Снижение тормозного тока ве-

дет к уменьшению уставки срабатывания, при этом появление дифференциального тока может привести к ложному срабатыванию защиты. Для предотвращения этого необходимо блокировать действие ДТЗ до того, как произойдет срабатывание основной ступени.

Существующие методы определения повреждений токовых цепей дифференциальной токовой защиты

Выявление обрыва токовых цепей ДТЗ происходит в нормальном режиме работы и может осуществляться одним из следующих способов:

- а) на основе небаланса дифференциального тока [4];
- б) путем анализа величин втекающих и вытекающих токов [5];
- в) на основании анализа приращений действующих значений дифференциального и тормозного токов.

Для метода (а) выявление повреждения происходит с выдержкой времени при значении дифференциального тока, выше заданной уставки, но меньше уставки срабатывания ДТЗ. Из-за большого уровня токов небаланса данный метод не применим к ДТЗ трансформатора. Также его недостатком является наличие выдержки времени.

С помощью метода (б) определяются мгновенные величины втекающих и вытекающих токов, затем вычисляются их действующие значения. Повреждения фиксируются, когда при неизменной величине втекающего тока значение вытекающего уменьшается. Помимо этого, величины втекающего и вытекающего токов должны оставаться неизменными в течение пяти секунд до того, как значения дифференциального тока превысят заданную уставку.

Реализация метода (в) предусматривает определение приращений действующих значений тормозного и дифференциального токов. Данный метод представляется предпочтительным, поскольку может быть адаптирован под любой тип ДТЗ, в том числе для защиты трансформатора.

Общий недостаток методов (б) и (в) – невозможность выявления неисправности цепей ТТ в случаях, когда ток по ним не протекает, а также при пробое изоляции токовых цепей в режимах КЗ.

Приращение действующего значения сигнала

Переходной процесс при вычислении действующего значения синусоидального сигнала частотой 50 Гц посредством дискретного преобразования Фурье (ДПФ) представлен на рис. 1 [6]. Из рисунка видно, что длительность переходного процесса составляет 20 мс. Данное время не зависит от амплитуды установившегося сигнала и фазы начала переходного процесса. Влияние на время переходного процесса могут оказывать частота сигнала, а также присутствие апериодической составляющей [7]. При обрыве вторичных цепей ТТ в токах, подводимых к устройству РЗА, апериодическая составляющая практически отсутствует, а в нормальном

режиме работы частота лежит в пределах $(50 \pm 0,4)$ Гц [8], что не оказывает существенного влияния на время переходного процесса.

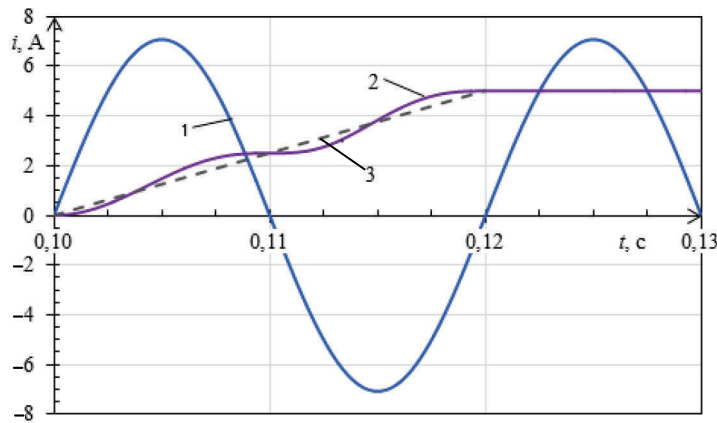


Рис. 1. Вычисление действующего значения синусоидального сигнала частотой 50 Гц в переходном режиме: 1 – входной синусоидальный сигнал; 2 – выходной сигнал дискретного преобразования Фурье; 3 – линейаризация переходного процесса дискретного преобразования Фурье

Fig. 1. The calculation of the RMS value of a sinusoidal signal with frequency of 50 Hz in the transient mode: 1 – input sinusoidal signal; 2 – output signal of the discrete Fourier transform; 3 – linearization of the transient discrete Fourier transform

Принимая время цифровой фильтрации и вычисления действующего значения, равным 20 мс, с некоторой погрешностью можно линейаризовать переходной процесс в соответствии с кривой 3 (рис. 1). Приращение линейаризованной функции (рис. 2) за время $\Delta t = 10$ мс определяется по выражению

$$\Delta I = I(t) - I(t - \Delta t), \quad (1)$$

где $I(t)$ – действующее значение тока в момент времени t ; $I(t - \Delta t)$ – действующее значение тока в момент времени $t - \Delta t$.

Кривая 2 на рис. 2 позволяет оценить скорость изменения действующего значения на выходе ДПФ и обладает следующими свойствами:

- а) функция достигает своего максимального значения за 10 мс;
- б) продолжительность существования максимального значения 10 мс;
- в) максимальное значение функции составляет половину установившегося значения кривой 1.

Переходной процесс в ДПФ был исследован при помощи математической модели, разработанной в среде MatLab Simulink [9–11]. Зависимости приращения, полученные на основе ДПФ и линейаризованного переходного процесса, представлены на рис. 3.

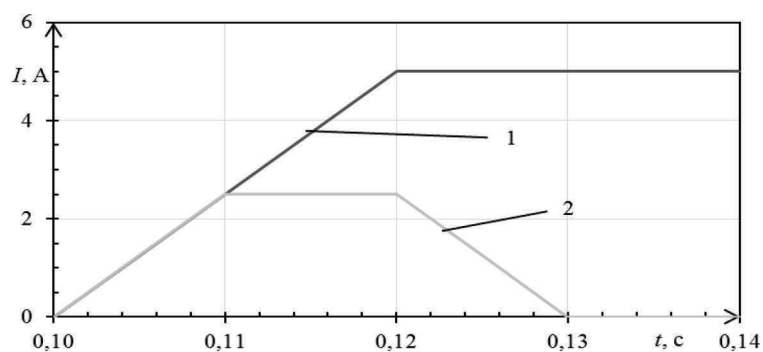


Рис. 2. Анализ переходного процесса дискретного преобразования Фурье (ДПФ)
1 – линейаризация переходного процесса ДПФ;
2 – скорость изменения сигнала на выходе ДПФ

Fig. 2. Analysis of the transient process of the discrete Fourier transform (DFT): 1 – linearization of the transient process of DPF; 2 – rate of change of the signal at the output of DFT

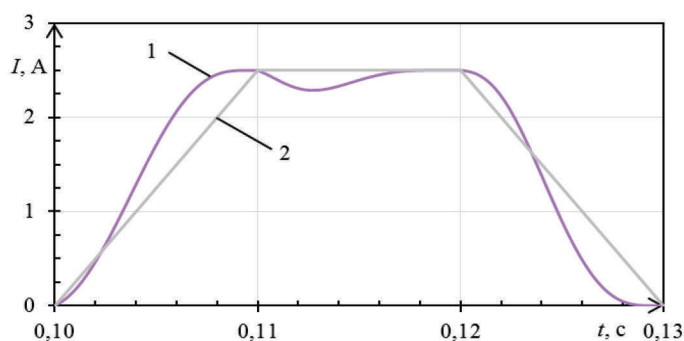


Рис. 3. Функции приращений: 1 – переходного процесса дискретного преобразования Фурье;
2 – линейаризованного переходного процесса ДПФ

Fig. 3. The increments function: 1 – DFT transient process;
2 – linearized DFT transient process

В результате исследований было установлено, что максимальное значение экспериментальной кривой 1 (рис. 3) не превышает максимального значения линейаризованной кривой 2. При этом погрешность линейаризации участка максимального приращения составляет не более 9 %.

Определение обрыва токовых цепей на основе приращений действующих значений тормозного и дифференциального токов

Для ДТЗ, в которых торможение осуществляется токами всех присоединений, обрыв токовых цепей сопровождается увеличением дифференциального и уменьшением на такую же величину тормозного тока. Данный принцип положен в основу алгоритма, представленного на рис. 4, где приняты следующие обозначения: $I_{\text{тор}}$ – действующее значение тормозного тока;

$I_{\text{диф}}$ – то же дифференциального тока; $\Delta I_{\text{тор}}$ – приращение тормозного тока; $\Delta I_{\text{диф}}$ – то же дифференциального тока; $\Delta I_{\text{блок}}$ – величина блокирующего приращения, рассчитывается по выражению

$$\Delta I_{\text{блок}} = 2\Delta I_{\text{диф}} + 2\Delta I_{\text{тор}}; \quad (2)$$

$\Delta I_{\text{ср}}$ – значение приращения срабатывания,

$$\Delta I_{\text{ср}} = 2\Delta I_{\text{тор}} - 2\Delta I_{\text{диф}}; \quad (3)$$

$I_{\text{блок}}$ – величина блокирующего тока,

$$I_{\text{блок}} = I_{\text{диф}} + I_{\text{тор}}. \quad (4)$$

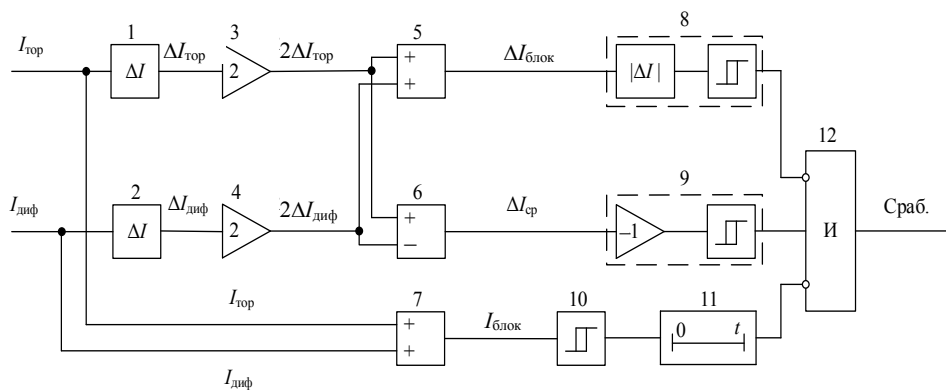


Рис. 4. Алгоритм определения обрыва токовых цепей на основе приращений тормозного и дифференциального токов: 1, 2 – блок расчета приращений; 3, 4 – блок усиления сигнала; 5, 7 – блок расчета суммы; 6 – блок расчета разности; 8 – измерительный орган абсолютного значения приращения; 9 – измерительный орган отрицательного приращения; 10 – измерительный орган тока; 11 – таймер на возврат; 12 – логический элемент «И»

Fig. 4. The algorithm for the open secondary circuits detection on the basis of brake and differential currents increments: 1, 2 – block of increments calculating; 3, 4 – block of signal amplification; 5, 7 – block of sum calculating; 6 – block of difference calculation; 8 – measuring device (MU) of the increment absolute value; 9 – MU of the negative increment; 10 – current MU; 11 – reset timer; 12 – logical element “AND”

С помощью блоков 5 и 8 формируется сигнал блокировки алгоритма при переходных процессах внутреннего или внешнего КЗ и в режимах, связанных со сбросом (с набросом) нагрузки. Блоки 7, 10 и 11 производят блокировку алгоритма в установившемся режиме внутреннего или внешнего КЗ, а также при переходных процессах, возникающих при отключении КЗ. Срабатывание алгоритма происходит при отсутствии сигналов на выходе блоков 8 и 11 и наличии разрешающего сигнала, формируемого блоком 9.

При обрыве токовых цепей приращение тормозного тока $\Delta I_{\text{тор}}$ будет отрицательным, а приращение дифференциального $\Delta I_{\text{диф}}$ положительным.

По абсолютному значению эти величины примерно равны между собой. Сигнал блокирующего приращения $\Delta I_{\text{блок}}$ останется практически без изменения и равным небалансу, обусловленному нелинейностью переходного процесса в ДПФ. Отстройка от указанного небаланса осуществляется с помощью измерительного органа (ИО) 8. Действующее значение блокирующего тока $I_{\text{блок}}$ не изменит своей величины, при этом $\Delta I_{\text{ср}}$ достигнет двукратного значения тока, протекавшего в оборвавшейся цепи ТТ. Так как ИО 8 и 10 не формируют блокирующих сигналов, а ИО 9 сработает, на выходе блока 12 возникнет сигнал о неисправности вторичных токовых цепей.

Оценка свойств метода определения обрыва вторичных токовых цепей дифференциальной токовой защиты

Чувствительность метода определяют уставки, задаваемые в блоках 8, 9 и 10 (рис. 4). Уставка блока 8 отстраивается от небаланса $\Delta I_{\text{блок}}$, возникающего при обрыве токовых цепей. Определение небаланса производилось путем моделирования обрыва токовых цепей при токах в диапазонах от 0 до номинального тока ТТ и значением фазы в момент обрыва от 0 до 180°. В результате было установлено, что небаланс $\Delta I_{\text{блок}}$ по отношению к действующему току поврежденных цепей ТТ не превышает 0,14. С учетом этого уставка блока 8 определяется

$$\Delta I_{\text{уст.блок}} = 0,14 K_{\text{отс}} I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}} = 0,14 \cdot 1,2 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}} = 0,168 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}, \quad (5)$$

где $\Delta I_{\text{уст.блок}}$ – уставка срабатывания ИО блока 8; $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,2; $I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}$ – номинальный вторичный ток ТТ с наибольшим коэффициентом трансформации.

Уставка блока 9 отстраивается от уставки ИО 8

$$\Delta I_{\text{уст.ср}} = K_{\text{отс}} \Delta I_{\text{уст.блок}} = 1,2 \cdot 0,168 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}} = 0,202 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}, \quad (6)$$

где $\Delta I_{\text{уст.ср}}$ – уставка срабатывания ИО блока 9.

Величина срабатывания элемента 10 отстраивается от тормозного тока в режиме максимальных нагрузок

$$I_{\text{уст.блок}} = 2 K_{\text{отс}} \frac{I_{\text{мах.нагр}}}{K_{\text{ТТ}}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{мах.нагр}}$ – первичный ток наиболее нагруженного присоединения; $K_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации ТТ.

С учетом того, что в алгоритме производится приведение приращений к действующему значению, минимальный ток $I_{\text{обн.мин}}$, пропадание которого сможет определить алгоритм, равен

$$I_{\text{обрн.мин}} = (1 + \varepsilon) \frac{\Delta I_{\text{уст.ср}}}{2} = (1 + 0,1) \cdot \frac{0,202 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}}{2} = 0,111 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}}, \quad (8)$$

где ε – погрешность ТТ.

Исходя из выражений (7) и (8), алгоритм определяет обрыв токовых цепей ДТЗ с протекающим током, находящимся в следующих пределах:

$$0,111 I_{\text{мах.ном}}^{\text{ТТ}} < I_{\text{ср}} < K_{\text{отс}} \frac{I_{\text{мах.нагр}}}{K_{\text{ТТ}}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{ср}}$ – вторичный ток ТТ с учетом приведения, пропадание которого может почувствовать представленный алгоритм.

Быстродействие алгоритма определяется временем расчета приращения Δt . Максимальное время срабатывания способа составляет 10 мс. Зависимость наибольшего времени срабатывания алгоритма от действующей величины тока, при котором происходит повреждение, представлена на рис. 5.

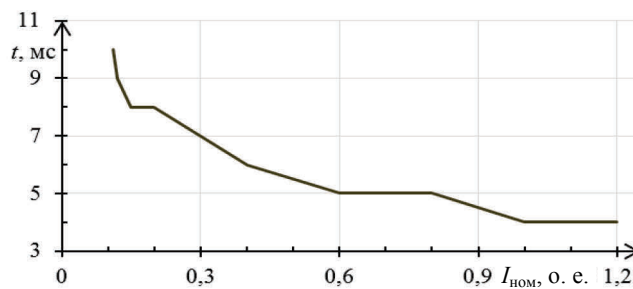


Рис. 5. Наибольшее время срабатывания алгоритма определения обрыва токовых цепей

Fig. 5. The highest response time of the detection algorithm for open current circuits

Селективность способа обеспечивается тем, что только при обрыве токовых цепей одновременно с увеличением дифференциального тока происходит снижение тормозного. Во всех остальных переходных режимах тормозной и дифференциальный токи одновременно увеличиваются или снижаются, либо изменяется только тормозной ток. Устойчивость алгоритма к токам небаланса в переходных режимах дополнительно обеспечивается ИО 8 (рис. 4), который срабатывает в случае, когда сумма приращений тормозного и дифференциального токов не равна нулю. Отстройка от небаланса приращений токов в режимах КЗ осуществляется блокировкой алгоритма с помощью блоков 10 и 11 (рис. 4).

Надежность обеспечивается продолжительностью существования сигнала срабатывания алгоритма. Для выбранного Δt это время составляет не менее 10 мс, что достаточно для применения в микропроцессорных

устройствах РЗА с интервалом расчета, равным или меньшим 10 мс. Зависимость минимальной продолжительности существования выходного сигнала от величины тока представлена на рис. 6.

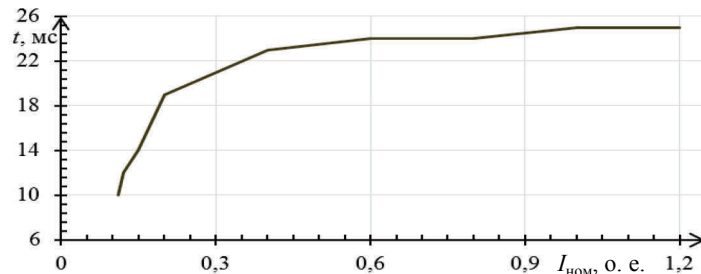


Рис. 6. Минимальное время существования сигнала неисправности токовых цепей

Fig. 6. The minimum time of the existence of the signal of fault of current circuits

ВЫВОДЫ

1. Определение обрыва токовых цепей ДТЗ с торможением суммой токов всех присоединений может быть выполнено на основе анализа приращений действующих величин дифференциального и тормозного токов.

2. Чувствительность предлагаемого метода ограничена нелинейностью переходных процессов в ДПФ. Минимальное значение тока, при котором возможно определение неисправности токовых цепей ДТЗ, составляет 0,111 номинального тока ТТ.

3. Надежность предлагаемого метода обеспечивается продолжительностью существования сигнала о неисправности цепей ТТ не менее 10 мс, что достаточно для применения в микропроцессорных устройствах РЗА с программным циклом расчета, равным или меньшим 10 мс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. 7-е и 6-е изд. М.: Госторгиздат, 2008. 504 с.
2. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
3. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
4. Реле микропроцессорное МР901, МР902 дифференциальной защиты шин: руководство по эксплуатации ПШИЖ 144.00.00.00.003 РЭ, редакция 3.00 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bemn.by/filedownload.php?file=3131.pdf>. Дата доступа: 20.04.2017.
5. Устройство защиты сборных шин REB670. Версия 2.1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/ac2020f4dcd54b8d802988ed68f26e1b/1MRK505340-BRU_A_ru_REB670_2.1.pdf. Дата доступа: 28.03.2017.
6. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: Технопринт, 2001. 133 с.
7. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.

8. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. 01.07.2014. М.: Росстандарт, 2014. 19 с.
9. 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.
10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
11. Дьяконов, В. П. MatLab и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2011. 975 с.

Поступила 03.10.2017 Подписана в печать 08.01.2018 Опубликовано онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. *Electrical Devices Installation Rules*. 7th and 6th eds. (2008) Moscow, Gostorgizdat Publ. 504 (in Russian).
2. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
3. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow. Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
4. *Microprocessor Relay MP901, MP902 for Differential Protection of Busbars: User Manual, PShIZh 144.00.00.00.003 RE, Revision 3.00*. Available at: <http://bemn.by/filedownload.php?file=3131.pdf> (Accessed 20 April 2017) (in Russian).
5. *Tire protection device REB670. Version 2.1. Product Guide*. Available at: https://library.e.abb.com/public/ac2020f4dcd54b8d802988ed68f26e1b/1MRK505340-BRU_A_ru_REB670_2.1.pdf (Accessed 28 March 2017) (in Russian).
6. Romaniuk F. A. (2001) *Information Support of Microprocessor-Based Protection of Electrical Installations*. Minsk, Technoprint. 133 p. (in Russian).
7. Rumiantsev Y. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Y., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417 (in Russian) DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.
8. State Standard 32144–2013 (2014) *Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Standards of Quality of Electric Energy in Systems of Power Supply of General Purpose*. Moscow, Rosstandart Publ. 19 (in Russian).
9. Novash I. V., Rumiantsev Y. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 23–38 (in Russian).
10. Chernykh I. V. (2008) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMC Press; Sankt-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
11. D'yakonov V. P. (2011) *MatLab u Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMC Press. 975 (in Russian).

Received: 3 October 2017

Accepted: 8 January 2018

Published online: 30 March 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-118-128

УДК 621.313

Разработка и анализ математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением

А. Б. Менжинский¹⁾, А. Н. Малашин¹⁾, Ю. В. Суходолов²⁾

¹⁾Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье представлено математическое моделирование генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением, в результате которого были получены эквивалентные электрические схемы и схемы магнитной цепи генераторов, а также выражения, описывающие электромагнитные процессы в генераторах линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением. Математические модели генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением учитывают геометрические параметры магнитной системы генераторов, действие реакции якоря, неравномерность распределения магнитного поля в магнитной системе генераторов и зависимость коэффициентов рассеяния, краевого эффекта (в линейных генераторах) и выпучивания (в возвратно-поступательных электрических генераторах) от координаты перемещения. Проведена оценка эффективности применения генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением, в результате которой было выявлено, что эффективность возвратно-поступательного генератора с электромагнитным возбуждением ограничена величиной перемещения подвижной части генератора, что можно отнести к недостатку данного типа генераторов. Поэтому возвратно-поступательный генератор с электромагнитным возбуждением эффективней всего использовать при малой величине рабочего хода подвижной части либо совместно с линейным генератором в качестве компенсатора торцевого эффекта при возвратно-поступательном движении. В линейном генераторе скорость изменения индуктивности и взаимной индуктивности на всем перемещении подвижной части практически постоянна. Поэтому при увеличении величины рабочего хода подвижной части его преимущества неоспоримы. Но следует отметить, что уменьшение величины рабочего хода для подвижной части линейного генератора ограничено конструктивными размерами магнитной системы генератора, что снижает эффективность его использования при малой величине рабочего хода подвижной части.

Ключевые слова: математическая модель, линейный электрический генератор, возвратно-поступательный генератор, свободнопоршневой двигатель

Для цитирования: Менжинский, А. Б. Разработка и анализ математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 118–128. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-118-128

Адрес для переписки

Суходолов Юрий Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-93
suhodolov@bntu.by

Address for correspondence

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

Developing and the Analysis of Mathematical Models of Generators of Linear and Reciprocating Types with Electromagnetic Excitation

A. B. Menzhinski¹⁾, A. N. Malashin¹⁾, Yu. V. Suhodolov²⁾

¹⁾Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

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

Abstract. The mathematical modeling of generators of linear and reciprocating types with electromagnetic excitation resulted in obtaining the equivalent electrical circuit and diagrams of magnetic circuit of generators as well as the expressions that describe the electromagnetic processes in generators of linear and reciprocating types with electromagnetic excitation is presented in the article. Mathematical models of generators of linear and reciprocating types with electromagnetic excitation take into account the geometrical parameters of the magnetic system of generators, effect of the armature reaction, the unequal distribution of the magnetic field in the magnetic system of the generators and the dependence of the scattering coefficient and the fringe effect (in linear generators) and buckling (in the reciprocating electric generators) on the coordinates of the movement. An evaluation of the effectiveness of the generators of linear and reciprocating types with electromagnetic excitation was performed that demonstrated that the efficiency of the reciprocating generator with electromagnetic excitation is limited to the amount of movement of the moving part of the generator that can be considered as a drawback of this type of generators. Therefore, the reciprocating generator with electromagnetic excitation is more effective to be used in a small value of the working stroke of the movable part of it or in conjunction with a linear generator as a compensator of the end effect in reciprocating motion. In the linear generator the rate of change of inductance and mutual inductance throughout the movement of the moving part is practically constant. So if an increase of the magnitude of the working stroke of the movable part takes place the benefits of the linear generator are undeniable. However, it should be noted that a reduction of the stroke magnitude of the movable part of the linear generator is limited by constructional dimensions of the magnetic system of the generator, which reduces its efficiency at low value of the working stroke of the movable part.

Keywords: mathematical model, linear electric generator, reciprocating generator, free-piston engine

For citation: Menzhinski A. B., Malashin A. N., Suhodolov Yu. V. (2018) Developing and the Analysis of Mathematical Models of Generators of Linear and Reciprocating Types with Electromagnetic Excitation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2), 118–128. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-118-128 (in Russian)

Современные системы энергоснабжения требуют разработки электро-механических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями. В связи с этим в настоящее время в качестве перспективного электромеханического преобразователя энергии рассматривается свободнопоршневой двигатель (СПД) с линейным электрическим генератором (ЛЭГ) [1–5].

Подобными энергоустановками на базе СПД в настоящее время занимаются множество фирм и научных университетов, таких как NOAX и Innas (Дания), Toyota Central R&D Labs Inc., Sandia National Laboratories, Питер Ван Блариган, Университет Тоёхаси, German Aerospace Center (DLR) и др.

Интерес к исследованию энергоустановок на базе СПД обусловлен рядом преимуществ в сравнении с классическими двигателями внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом (ДВС с КШМ): относительной простотой конструкции, на 40 % меньшим количеством элементов, отсутствием вращающихся частей, что в 2,5–3 раза уменьшает габаритную мощность, удельную массу и металлоемкость СПД [2]. Кроме того, отсутствие КШМ делает такт расширения СПД более быстрым, что снижает потери от теплопередачи теплоты в рабочих цилиндрах. Что касается основных эксплуатационных преимуществ СПД – это сниженный на 30 % расход топлива [1], уменьшенная длительность пуска СПД, сниженная шумность за счет возможности обеспечения противофазной работы автономных модулей. Также следует отметить, что СПД ввиду меньшего числа пар трения обладают меньшими механическими потерями, имеют повышенную надежность и ресурс при одновременном снижении периодичности технического обслуживания. Кроме того, СПДВС при его использовании совместно с электрическими генераторами имеет возможность непрерывного изменения геометрической степени сжатия в двигателе, за счет чего двигатель может работать на более широкой номенклатуре топлив. К тому же в подобной энергоустановке может быть реализован процесс управляемого самовоспламенения НСЦИ (Homogeneous charge compression ignition), позволяющий существенно улучшить показатели топливной экономичности и экологичности [2].

Важное конструктивное преимущество энергоустановок на базе СПД – это сравнительно легкое их модульное исполнение. Необходимый номинал выходной мощности энергоустановки формируется набором некоторого числа автономных модулей. Модульная конструкция энергоустановки на базе СПД обладает повышенной надежностью и живучестью за счет сохранения частичной работоспособности при аварийных отказах части модулей. Кроме того, появляется возможность нагружать СПД на оптимальную нагрузку, тем самым обеспечить его работу в режиме, близком к оптимизированному по расходу топлива.

Как показали исследования, наиболее перспективными электромеханическими преобразователями энергии в СПД являются ЛЭГ, возвратно-поступательные электрические генераторы (ВПЭГ) и их комбинация. Математическому описанию генераторов линейного типа посвящено достаточное количество работ, что не скажешь про генераторы возвратно-поступательного типа [6, 7], однако в большинстве из них рассматриваются генераторы с постоянными магнитами, в то время как генераторам линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением (рис. 1а, б), обладающим большей надежностью, меньшей стоимостью производства, простотой конструкции и регулировки потока возбуждения по сравнению с магнитоэлектрическими генераторами, уделяется меньше внимания ввиду их повышенных массогабаритных показателей.

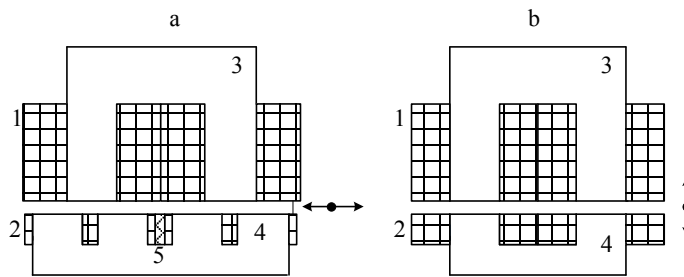


Рис. 1. Генераторы линейного (а) и возвратно-поступательного (б) типов с электромагнитным возбуждением: 1 – рабочая обмотка; 2 – обмотка возбуждения; 3, 4 – неподвижная и подвижная части магнитопровода; 5 – изоляционная вставка
 Fig. 1. Generators of linear (a) and reciprocating (b) types with electromagnetic excitation: 1 – operating winding; 2 – excitation winding; 3, 4 – fixed and movable parts of the magnetic circuit; 5 – insulation insert

Однако в стационарных современных системах энергоснабжения, где не столь важны массогабаритные показатели, генераторы линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением могли бы найти широкое практическое применение. В результате этого возникает необходимость в математическом описании генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением с целью их дальнейшего анализа и оценки эффективности применения. Математические модели генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением должны учитывать геометрические параметры магнитной системы генераторов, действие реакции якоря, неравномерность распределения магнитного поля в магнитной системе генераторов и зависимость коэффициентов рассеяния, краевого эффекта (для ЛЭГ) и выпучивания (для ВПЭГ) от координаты перемещения.

На начальном этапе разработки математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением был принят ряд традиционных допущений [8–10]:

- 1) целесообразно пренебречь потерями в магнитопроводе от вихревых токов и магнитным сопротивлением магнитопровода;
- 2) магнитопровод считается ненасыщенным, т. е. относительная магнитная проницаемость магнитопровода принимается равной бесконечности;
- 3) пренебрегаем индуктивностями рассеяния контуров.

Условия функционирования генераторов:

- однофазное исполнение генераторов;
- активно-индуктивная нагрузка генераторов;
- обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока;
- перемещение подвижной части генератора вдоль оси с синусоидальным законом изменения координаты во времени.

В генераторах линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением система уравнений Кирхгофа для напряже-

ний обмоток состоит из s уравнений, составленных для каждого из контуров. Уравнение для k -го контура имеет вид [9]

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt}, \quad (1)$$

где R_k , i_k , ψ_k – активное сопротивление, ток и потокосцепление k -го контура соответственно.

В линейном приближении (при допущении о бесконечно большой проницаемости материала магнитопровода) потокосцепление k -го контура ψ_k может быть выражено через токи в обмотках i_n , индуктивность k -й обмотки L_{kk} и взаимные индуктивности k -й обмотки со всеми прочими обмотками L_{kn} , где n принимает любые значения – от 1 до s :

$$\psi_k = \sum_{n=1}^s \psi_{kn} = \sum_{n=1}^s i_n L_{kn}. \quad (2)$$

Следует отметить, что индуктивность и взаимноиндуктивности являются функциями координаты перемещения x . В соответствие элементарным модулям рассматриваемых конструкций генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением (рис. 1) может быть поставлена эквивалентная электрическая схема (рис. 2, 3). На рис. 2, 3: L_{0k} , R_{0k} – индуктивность и активное сопротивление рабочей обмотки; L_{vk} , L_{vk1} , L_{vk2} , R_{vk} , R_{vk1} , R_{vk2} – то же обмотки возбуждения; e_k – ЭДС движения; I_{mk} , I_{mk1} , I_{mk2} – источники тока в обмотке возбуждения.

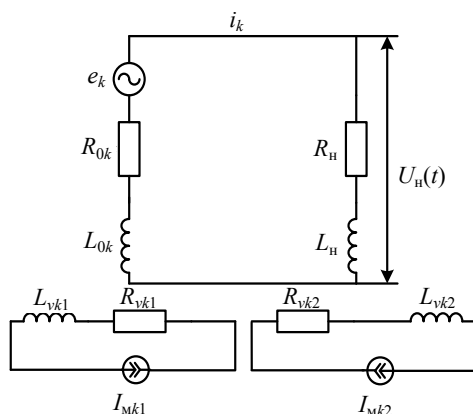


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема для k -го рабочего контура линейного электрического генератора при работе на активно-индуктивную нагрузку

Fig. 2. The equivalent circuit diagram of the k^{th} working circuit of a linear electric generator operating for the active-inductive load

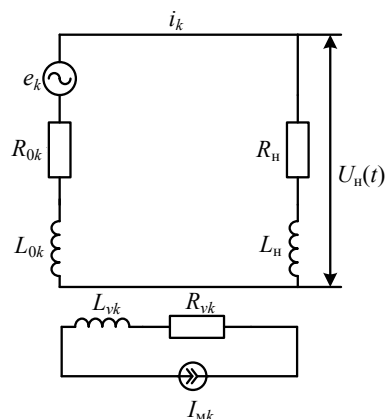


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема для k -го рабочего контура возвратно-поступательного электрического генератора при работе на активно-индуктивную нагрузку

Fig. 3. The equivalent circuit diagram of the k^{th} working circuit of the reciprocating electric generator operating for the active-inductive load

Если перемещение x является независимой функцией времени $x(t)$, следовательно, индуктивность, взаимоиндуктивности и проводимости также будут независимыми функциями времени [11]. Таким образом, согласно эквивалентным электрическим схемам, представленным на рис. 2, 3, и выражениям (1), (2), уравнения электрического равновесия для k -го рабочего контура ЛЭГ и ВПЭГ с электромагнитным возбуждением можно записать в виде:

– для ЛЭГ

$$i_k(R_{0k} + R_n) + i_k \left(\frac{dL_{0kk}}{dt} \right) + \frac{di_k}{dt}(L_{0kk} + L_n) + I_{mk1} \frac{dL_{0kvk1}}{dt} + I_{mk2} \frac{dL_{0kvk2}}{dt} = 0; \quad (3)$$

– для ВПЭГ

$$i_k(R_{0k} + R_n) + i_k \left(\frac{dL_{0kk}}{dt} \right) + \frac{di_k}{dt}(L_{0kk} + L_n) + I_{mk} \frac{dL_{0kvk}}{dt} = 0, \quad (4)$$

где i_k – ток k -го контура; R_{0k} – активное сопротивление обмотки k -го контура; R_n – то же нагрузки; L_{vk} , L_{0kvk1} , L_{0kvk2} – взаимоиндуктивности контуров; L_{0kk} – собственная индуктивность k -го контура; L_n – индуктивность нагрузки; I_{mk} , I_{mk1} , I_{mk2} – токи в обмотках возбуждения.

Выражение для напряжения нагрузки для k -го рабочего контура генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением можно записать в виде [7]

$$U_{nk} = i_k R_n + L_n \frac{di_k}{dt}. \quad (5)$$

Таким образом, полученные уравнения (3)–(5) полностью описывают электромагнитные процессы в ЛЭГ и ВПЭГ с электромагнитным возбуждением.

Для расчета собственной индуктивности и взаимоиндуктивностей составим эквивалентную схему магнитной цепи ЛЭГ и ВПЭГ.

Анализ картины распределения магнитного поля с помощью программного продукта ELCUT 5.1 показал, что ЛЭГ и ВПЭГ может быть поставлена в соответствие эквивалентная схема магнитной цепи, показанная на рис. 4, 5.

На рис. 4 индексы 1 и 2 относятся к левой и правой обмоткам возбуждения соответственно. Обозначения на рис. 4: $G_1 = \frac{G_{e1}G_{\delta1}}{G_{e1} + G_{\delta1}}$ и

$G_2 = \frac{G_{e2}G_{\delta2}}{G_{e2} + G_{\delta2}}$, где $G_{\delta1}$, $G_{\delta2}$ – магнитные проводимости воздушных зазо-

ров; G_{e1} , G_{e2} – то же воздушных промежутков по путям потоков краевого эффекта; $G_{\sigma1}$, $G_{\sigma2}$ – то же воздушных промежутков по путям потоков рассеяния; F_{mk1} , F_{mk2} – МДС обмоток возбуждения; F_{0k} – МДС рабочей обмотки; Φ_{0k} – магнитный поток через рабочую обмотку.

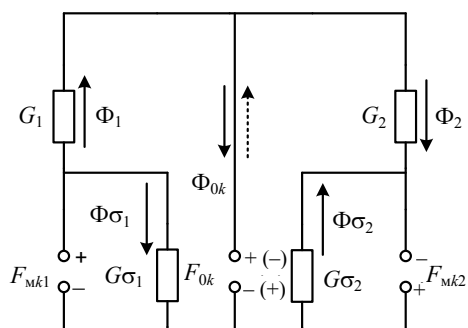


Рис. 4. Эквивалентная схема магнитной цепи линейного электрического генератора

Fig. 4. The equivalent circuit of the magnetic circuit of a linear electric generator

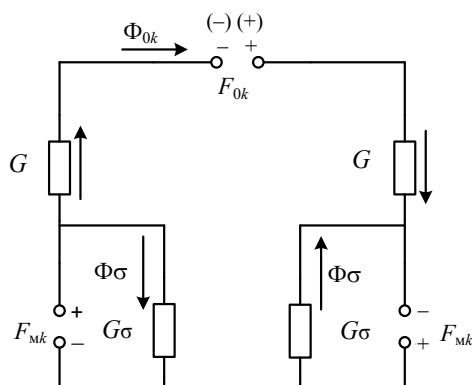


Рис. 5. Эквивалентная схема магнитной цепи возвратно-поступательного электрического генератора

Fig. 5. The equivalent circuit of the magnetic circuit of a reciprocating electric generator

На рис. 5 приняты обозначения: $G = \frac{G_e G_\delta}{G_e + G_\delta}$; G_δ – магнитная проводимость воздушного зазора; G_e – то же воздушного промежутка по пути потока выпучивания; G_σ – то же воздушного промежутка по пути потока рассеяния; F_{mk} – МДС обмотки возбуждения; F_{0k} – МДС рабочей обмотки; Φ_{0k} – магнитный поток через рабочую обмотку.

Для определения магнитных потоков эквивалентных магнитных цепей (рис. 4, 5) применимы законы Кирхгофа [8] – закон равновесия МДС и закон равенства потоков в узле:

– для ЛЭГ

$$\begin{cases} \frac{\Phi_1}{G_1} + \frac{\Phi_2}{G_2} = \frac{F_{mk1}}{\sigma} + \frac{F_{mk2}}{\sigma}; \\ \frac{\Phi_1}{G_1} = \frac{F_{mk1}}{\sigma} \pm \frac{F_{0k}}{\sigma}; \\ \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_{0k}, \end{cases} \quad (6)$$

где σ – коэффициент рассеяния магнитного потока;

– для ВПЭГ

$$\frac{2\Phi_{0k}}{G} = \frac{2F_{mk}}{\sigma} \pm \frac{F_{0k}}{\sigma}. \quad (7)$$

Зная магнитные потоки эквивалентных магнитных цепей, применив методику, изложенную в [8], определим величины собственной индуктивности L_{0kk} и взаимоиндуктивностей L_{0kvk1} , L_{0kvk2} и L_{0kvk} для генераторов линей-

ного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением.

Собственные индуктивности L_{0kk} для ЛЭГ и ВПЭГ определяются по формулам:

$$L_{0kk} = \pm \left(\frac{G_1}{\sigma} - \frac{G_2}{\sigma} \right) \omega_{0k}^2 = G_{0l} \omega_{0k}^2; \quad (8)$$

$$L_{0kk} = \pm \frac{G}{2\sigma} \omega_{0k}^2 = \frac{G_{0v}}{2} \omega_{0k}^2. \quad (9)$$

Взаимоиндуктивности L_{0kvk1} , L_{0kvk2} и L_{0kvk} для ЛЭГ и ВПЭГ определяются из выражений:

$$L_{0kvk1} = \frac{\omega_{mk1} \omega_{0k} G_1}{\sigma} = \omega_{mk1} \omega_{0k} G_{0l1}; \quad (10)$$

$$L_{0kvk2} = -\frac{\omega_{mk2} \omega_{0k} G_2}{\sigma} = \omega_{mk1} \omega_{0k} G_{0l2}; \quad (11)$$

$$L_{0kvk} = \omega_{mk} \omega_{0k} G_{0v}. \quad (12)$$

Теперь, когда определены все индуктивности и взаимоиנדуктивности, уравнение электрического равновесия и напряжения нагрузки для k -го рабочего контура генераторов можно записать в виде:

– для ЛЭГ

$$i_k (R_{0k} + R_n) + i_k \omega_{0k}^2 \frac{dG_{0l}}{dt} + \frac{di_k}{dt} \left(L_n + G_{0l} \omega_{0k}^2 \right) + \omega_{0k} \left(\omega_{mk1} I_{mk1} \frac{dG_{0l1}}{dt} - \omega_{mk2} I_{mk2} \frac{dG_{0l2}}{dt} \right) = 0; \quad (13)$$

– для ВПЭГ

$$i_k (R_{0k} + R_n) + \frac{i_k \omega_{0k}^2}{2} \frac{dG_{0v}}{dt} + \frac{di_k}{dt} \left(L_n + \frac{G_{0v} \omega_{0k}^2}{2} \right) + \omega_{mk} \omega_{0k} I_{mk} \frac{dG_{0v}}{dt} = 0. \quad (14)$$

Полученные выражения (13) и (14) описывают электромагнитные процессы в генераторах линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением, решение которых численным методом с использованием программного комплекса MathCad позволяет получить временные диаграммы напряжения и тока установившегося режима работы, а также индуктивностей и взаимоиנדуктивностей в генераторах линейного и возвратно-поступательного типов. Временные диаграммы тока в рабочей обмотке, индуктивности и взаимоиנדуктивности генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением представлены на рис. 6, 7.

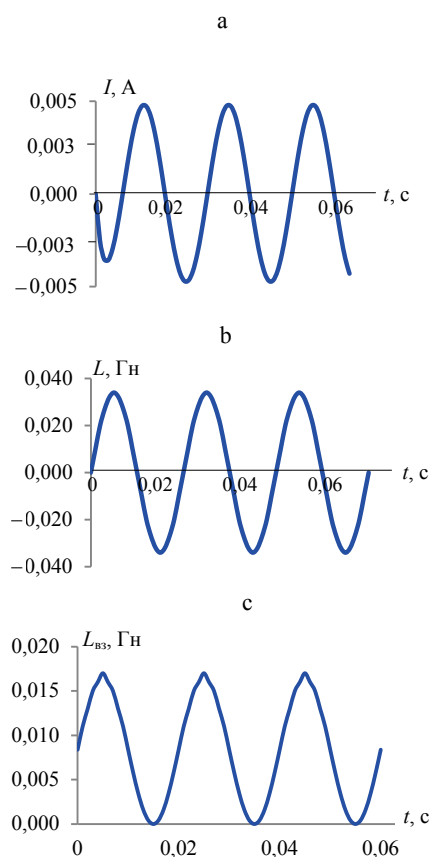


Рис. 6. Временные диаграммы тока (а), индуктивности (б) и взаимной индуктивности (с) линейного электрического генератора

Fig. 6. Time diagrams of current (a), inductance (b) and mutual inductance (c) of a linear electric generator

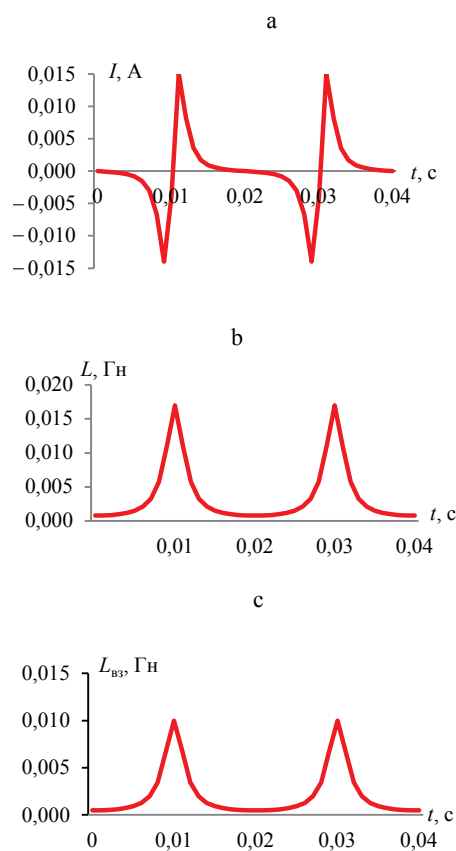


Рис. 7. Временные диаграммы тока (а), индуктивности (б) и взаимной индуктивности (с) возвратно-поступательного электрического генератора

Fig. 7. Time diagrams of current (a), inductance (b) and mutual inductance (c) of a reciprocating electric generator

ВЫВОДЫ

1. Из временных диаграмм, представленных на рис. 6 и 7, видно, что кривые тока, индуктивности и взаимной индуктивности линейного генератора близки к синусоиде, чего нельзя сказать о возвратно-поступательном электрическом генераторе. Это обусловлено, прежде всего, особенностями конструкции магнитной системы и принципом работы генератора.

2. Следует отметить, что зависимость индуктивности и взаимной индуктивности от координаты перемещения в генераторе возвратно-поступательного типа носит различный характер. При малых перемещениях подвижной части генератора эта зависимость близка к линейной и, как показали расчеты, скорость изменения индуктивности и взаимной индуктивности на данном интервале перемещения значительно больше по сравнению с

генераторами линейного типа при такой же величине перемещения. С увеличением перемещения линейность исчезает, а скорость изменения индуктивности и взаимоиндуктивности уменьшается, что снижает эффективность преобразования механической энергии в электрическую. Числовое значение величины перемещения, при котором исчезает линейность изменения индуктивности и взаимоиндуктивности от координаты перемещения, обусловлена геометрическими размерами и особенностями конструктивного исполнения магнитной системы возвратно-поступательного генератора.

3. Эффективность возвратно-поступательного генератора с электромагнитным возбуждением ограничена величиной перемещения подвижной части генератора, что можно отнести к недостатку данного типа генераторов. Поэтому возвратно-поступательный генератор с электромагнитным возбуждением эффективнее всего использовать при малой величине рабочего хода подвижной части либо совместно с линейным генератором в качестве компенсатора торцевого эффекта при возвратно-поступательном движении. Что касается линейного генератора, то, как видно из временных диаграмм, скорость изменения индуктивности и взаимоиндуктивности на всем перемещении подвижной части практически постоянна. Поэтому при увеличении величины рабочего хода подвижной части его преимущества неоспоримы. Но следует отметить, что уменьшение величины рабочего хода для подвижной части линейного генератора ограничено конструктивными размерами магнитной системы генератора, что снижает эффективность его использования при малой величине рабочего хода подвижной части.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф. И. Пинский // Мобильная техника. 2004. № 2. С. 13–17.
2. Achten, P. A. J. Design of a Hydraulic Free-Piston Engine / P. A. J. Achten, J. P. J. Van Den Oever, J. Potma, G. E. M. Vael // SAE Off-Highway Engineering. 2001. February. P. 23–28.
3. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы / Э. С. Темнов. Тула, 2005. 134 с.
4. Костиков, В. Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование / В. Г. Костиков, Е. М. Парфенов, Е. М. Шахнов. 2-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. 344 с.
5. Cawthorne, W. R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine / W. R. Cawthorne. West Virginia: Morgantown, 1999. 113 p.
6. Использование возвратно-поступательной схемы электрического генератора для повышения эффективности энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. 2016. Т. 53, № 4. С. 108–114.
7. Сафонов, В. А. Термомеханический двигатель с линейным генератором, работающий по циклу Стирлинга / В. А. Сафонов, И. Л. Белецкий, П. Н. Кузнецов // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 4. С. 60–62.

8. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. СПб.: КОРОНА принт, 2013. 368 с.
9. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1980. 928 с.
10. Балагуров, В. А. Электрические машины с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов. М.: Энергия, 1964. 480 с.
11. Уайт, Д. К. Электромеханическое преобразование энергии / Д. К. Уайт, Г. Г. Вудсон. Нью-Йорк, 1959. 528 с.

Поступила 21.03.2017 Подписана в печать 29.05.2017 Опубликовано онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Pinski F. I. (2004) Free Piston Engine-Generator Power Installations. *Mobil'naya Tekhnika* [Mobile Technology], (2), 13–17 (in Russian).
2. Achten P. A. J., Van Den Oever J. P. J., Potma J., Vael G. E. M. (2001, February) Design of a Hydraulic Free-Piston Engine. *SAE Off-Highway Engineering*, 23–28.
3. Temnov E. S. (2005) *Development of Theoretical Bases of Calculation and Design of Small Engine Generator Sets as a United Dynamic System*. Tula. 134 (in Russian).
4. Kostikov V. G., Parfenov E. M., Shakhnov E. M. (2001) *Power Supplies for Electronic Means. Circuit Design and Construction*. 2nd ed. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom Publ. 344 (in Russian).
5. Cawthorne W. R. (1999) *Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine*. Dept. Computer Science and Elect. Eng., Univ. West Virginia, Morgantown. 113.
6. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Kaleda A. E., Sidyako O. V. (2016) The Use of the Reciprocating Electrical Generator to Improve the Efficiency of Power Units of Autonomous Specimens of Weapons. *Vestnik Voennoi Akademii Respubliki Belarus'* [Herald of the Military Academy of the Republic of Belarus], 53 (4), 108–114 (in Russian).
7. Safonov V. A., Beletskii I. L., Kuznetsov P. N. (2014) Thermomechanical Engine with a Linear Generator Operating in Accordance with the Stirling Cycle. *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya = Aerospace Technic and Technology*, (4), 60–62 (in Russian).
8. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. (2013) *Synchronous Electrical Machines of Reciprocating Motion*. Saint Petersburg, KORONA Print Publ. 368 (in Russian).
9. Ivanov-Smolenskii A. V. (1980) *Electrical Machines*. Moscow, Energiya Publ. 928 (in Russian).
10. Balagurov V. A., Galteyev F. F., Larionov A. N. (1964) *Electric Machines with Permanent Magnets*. Moscow, Energiya Publ. 480 (in Russian).
11. White D. C., Woodson H. H. (1959) *Electromechanical Energy Conversion*. New York, Wiley. 528.

Received: 21 March 2017

Accepted: 29 May 2017

Published online: 30 March 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-129-140

УДК 621.313.333

Асинхронный двигатель с перфорированным полым ротором

А. Н. Анненков¹⁾, С. В. Сизиков²⁾, А. И. Шиянов¹⁾

¹⁾Международный институт компьютерных технологий (Воронеж, Российская Федерация),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Выполнен краткий анализ проведенных исследований асинхронных исполнительных микродвигателей, описана конструкция асинхронного двигателя с перфорированным полым ротором, приведены основные соотношения, определяющие геометрию ротора и непосредственно влияющие на энергетические показатели электрической машины. Представлены расчеты для определения геометрии окон, расположенных в пределах части активной длины пакета статора в области, примыкающей к сплошному «лобовому» участку поверхности стакана со стороны его торца, противоположного дну стакана ротора. В асинхронном двигателе с перфорированным полым ротором достигается улучшение энергетических показателей асинхронных двигателей с полым ротором (повышение максимального момента, КПД и $\cos\varphi$ двигателя). Указанные преимущества обеспечиваются тем, что окна в стакане полого ротора расположены в пределах части активной длины пакета статора в зоне, примыкающей к сплошному «лобовому» участку поверхности стакана ротора со стороны его торца, противоположного дну стакана. В конструкции полого ротора дно стакана с одного из торцов играет роль сверхпроводящего короткозамыкающего кольца, поэтому коэффициент увеличения сопротивления, обусловленный поперечным краевым эффектом, зависит от распределения токов ротора в области, примыкающей к сплошному «лобовому» участку поверхности стакана со стороны его торца, противоположного дну стакана. При анализе распределения плотности тока в полом роторе с аксиальной длиной L все электрические постоянные и геометрические размеры, входящие в расчет, – известные величины. Произвольно заданными постоянными являются первичные токи и частота вращения ротора. По мере увеличения скорости вращения благодаря наличию окон со стороны одного торца ротора и влиянию дна стакана с другого элементарные токи ротора в пределах активной длины расточки машины будут направлены преимущественно в аксиальном направлении, в том числе при сравнительно малых скольжениях, соответствующих малым частотам перемагничивания материала ротора. То есть часть активной поверхности ротора со стороны торца, противоположного дну его стакана, не будет выполнять функции лобовой части обмотки при снижении частоты токов в материале ротора. Это обеспечивает увеличение активной составляющей тока ротора, пропорциональной электромагнитному моменту двигателя. Соответственно лобовые части эквивалентной обмотки полого ротора, токи через которые не создают момент, не будут распространяться на высоких скоростях вращения в область активной длины машины.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, перфорированный полый ротор, геометрия ротора, статор, «лобовой» участок

Для цитирования: Анненков, А. Н. Асинхронный двигатель с перфорированным полым ротором / А. Н. Анненков, С. В. Сизиков, А. И. Шиянов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 129–140. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-129-140

Адрес для переписки

Сизиков Сергей Вячеславович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-84-61
eie@bntu.by

Address for correspondence

Sizikov Sergey V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-84-61
eie@bntu.by

Asynchronous Motor with a Hollow Perforated Rotor

A. N. Annenkov¹⁾, S. V. Sizikov²⁾, A. I. Shiyanov¹⁾

¹⁾International Institute of Computer Technologies (Voronezh, Russian Federation),

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

Abstract. The paper presents a brief analysis of the conducted researches of the asynchronous executive motors and the induction motor, as well as the design of the asynchronous executive motor with a hollow perforated rotor. The basic relationships for determining the geometry of the rotor that directly influences the energy performance of the electric machine are also presented. The calculations to determine the geometry of the windows, located within a part of the active length of the stator package in the zone adjacent to the solid frontal area of the surface of the barrel from the side of its end face that is opposite to the bottom of the rotor barrel. In an asynchronous motor with a hollow perforated rotor improvement of energy performance (increase of maximum torque, efficiency and $\cos\phi$ of the engine) is achieved. These advantages are provided by the fact that the windows in the hollow rotor barrel are located within the part of the active length of the stator package in the zone adjacent to the solid frontal section of the rotor barrel surface on its end face that is opposite to the bottom of the barrel. In accordance with the design of the hollow rotor, the bottom of the barrel of one of the ends acts as superconducting short-circulating ring, therefore the ratio of increase in resistance (caused by the transverse edge effect) depends on the distribution of the rotor currents in the area adjacent to the solid frontal portion of the surface of the barrel on end that is opposite to the bottom of the barrel. In the analysis of current density distribution in a hollow rotor with the axial length L' , all electric constant and geometric dimensions that are taken into account in the calculation are known values. Arbitrarily set constants are the primary currents and the rotational frequency of the rotor. With the rotation speed increase, due to the presence of the windows on one end face of the rotor and to the impact of the bottom of the barrel on the other one, the elementary currents of the rotor within the active length of the machine boring would be directed mainly in the axial direction, including the cases of comparatively small slip-page that corresponds to the small frequency of the alternating magnetization of the rotor material. I. e. a certain part of the active surface of the rotor on the end that is opposite to the bottom of its barrel would not function as the frontal part of the winding while reducing the frequency of currents in the rotor material. This provides an increase in the active component of the rotor current that is proportional to the electromagnetic torque of the motor. Correspondingly, the frontal parts of equivalent winding of the hollow rotor (through which the currents do not generate torque) would not be spread at high rotational speeds to the area of the active length of the machine.

Keywords: asynchronous motor, hollow perforated rotor, geometry of the rotor, stator, frontal area

For citation: Annenkov A. N., Sizikov S. V., Shiyanov A. I. (2018) Asynchronous Motor with a Hollow Perforated Rotor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 129–140. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-129-140 (in Russian)

Введение

Асинхронные двигатели с полым ротором в настоящее время широко применяются в системах траекторного управления, следящих системах передачи угла, инерциальных навигационных системах, пилотажно-навигационных индикаторах, указателях скорости поворота и т. п.

Распространенная конструкция асинхронного двигателя с полым ротором [1] включает в себя статор с обмотками возбуждения и управления, шихтованный магнитопровод (ярмо) и сплошной полый ротор. Недостаток этого технического решения – негативное влияние на энергетические ха-

рактеристики машины поперечного краевого эффекта [2], связанного с растеканием тока в материале ротора, а именно: вихревые токи замыкаются не только в выступающих (лобовых) частях, но и в активной области ротора.

Известна конструкция асинхронного индукторного двигателя [3] с двумя пакетами, содержащими обмотки, и полым ротором, имеющим окна на цилиндрической части, расположенные вдоль всей активной длины статора, образующие зубцовую зону ротора, при этом зубцовые зоны статоров расположены с относительным сдвигом на четверть зубцового деления ротора. Полый ротор этого двигателя имеет окна на цилиндрической части, расположенные вдоль всей активной длины пакета статора. Сам двигатель – тихоходный, работает на зубцовых гармониках. Окна в роторе, выполненные вдоль всей активной длины, функционально необходимы для обеспечения электромагнитной редукции скорости.

Главным недостатком в данной конструкции электрической машины являются низкие значения КПД и $\cos\varphi$. Наличие пазов вдоль всей активной длины определяет высокое значение активной составляющей сопротивления полого ротора. Данный эффект доминирует над уменьшением сопротивления, связанным с отсутствием поперечного краевого эффекта в материале ротора.

Исследования, направленные на поиски оптимальных соотношений размеров и параметров асинхронных исполнительных двигателей, проводились многими учеными и специалистами. Например, в [4] авторы предлагают уточненный алгоритм оптимизации соотношений размеров асинхронных исполнительных микродвигателей и, в частности, микродвигателей с полым немагнитным ротором. В результате проведенных оптимизационных расчетов были получены зависимости объема корпуса двигателя и его наружной поверхности от конструктивного коэффициента k_{lk} , называемого относительной длиной корпуса, который связывает длину машины и ее диаметр в оптимальном соотношении, обеспечивающем получение минимальной электромеханической постоянной времени и объема машины. Однако в [4] не исследовались вопросы, связанные с улучшением энергетических показателей микродвигателей с полым ротором.

В [5] авторами был проведен анализ влияния основных факторов на технико-эксплуатационные показатели индукционных асинхронных микромашин с полым ротором и предложен один из возможных вариантов решения проблемы, связанной с повышением энергетических характеристик этих двигателей.

В частности, на основе [6] предлагалось изготавливать полый ротор из железомедного сплава типа СМ с вполне определенными массовыми соотношениями между железом и медью в сплаве. Как утверждают авторы [7], применение в асинхронных исполнительных микродвигателях полого ротора из такого сплава позволяет увеличить максимальный момент и КПД двигателя. В [8] были проведены исследования подобных микродвигателей, которые позволили подтвердить эти утверждения.

Расчет параметров перфорированного полого ротора

В асинхронном двигателе с перфорированным полым ротором достигается улучшение энергетических показателей асинхронных двигателей с полым ротором (повышение максимального момента, КПД и $\cos\varphi$ двигателя) [9, 10]. Указанные преимущества обеспечиваются тем, что окна в стакане полого ротора расположены в пределах части активной длины пакета статора в зоне, примыкающей к сплошному «лобовому» участку поверхности стакана ротора со стороны его торца, противоположного дну стакана.

Конструкция асинхронного двигателя с перфорированным полым ротором приведена на рис. 1. В конструкции полого ротора дно стакана с одного из торцов играет роль сверхпроводящего короткозамыкающего кольца [2], поэтому коэффициент увеличения сопротивления, обусловленный поперечным краевым эффектом, зависит от распределения токов ротора в области, примыкающей к сплошному «лобовому» участку поверхности стакана со стороны его торца, противоположного дну стакана.

При анализе распределения плотности тока в полем роторе с аксиальной длиной L' все электрические постоянные и геометрические размеры, входящие в расчет, – известные величины. Произвольно заданными постоянными являются первичные токи и частота вращения ротора.

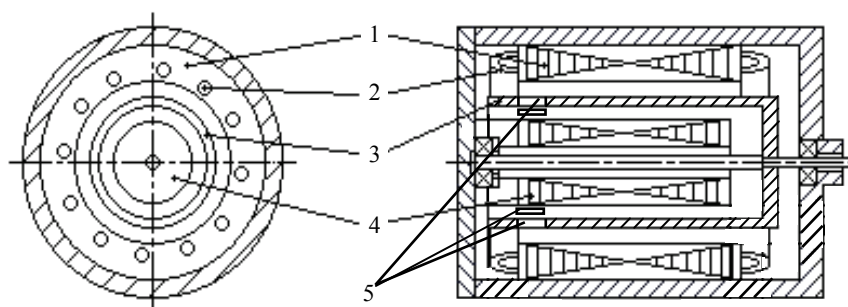


Рис. 1. Асинхронный двигатель с перфорированным полым ротором:
1 – шихтованный пакет статора; 2 – шихтованный магнитопровод; 3 – полый ротор;
4 – двухфазная обмотка; 5 – окна в материале ротора

Fig. 1. Asynchronous motor with a hollow perforated rotor:
1 – laminated stack of the stator; 2 – laminated magnetic core; 3 – hollow rotor;
4 – two-phase winding; 5 – windows in the rotor material

Развертка ротора без дна и расположение осей координат показаны на рис. 2. Над плоскостью развертки ротора предполагается развертка наружного статора с распределенной обмоткой, под плоскостью развертки располагается развертка внутреннего статора.

Ротор разбит на три области: область I представляет собой часть ротора, находящуюся в воздушном зазоре между наружным и внутренним статорами, на рис. 2 она показана в виде полосы шириной L с границами, очер-

ченными пунктирными линиями. Области II и III образуются равными по ширине частями ротора, выступающими за пределы статорной рас-
точки. Полная длина ротора обозначена L_1 . Ось x делит развертку ротора пополам.

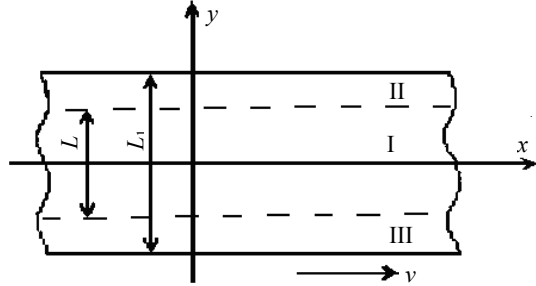


Рис. 2. Развертка полого ротора без дна
Fig. 2. Scan a hollow rotor without a bottom

В роторе выделяется элементарная прямоугольная площадка со сторо-
нами Δx и Δy (рис. 3) и трубка по контуру этой площадки. Положительное
направление H совпадает с осью z . Площадка вместе со всем ротором дви-
жется со скоростью v в сторону, указанную стрелкой.

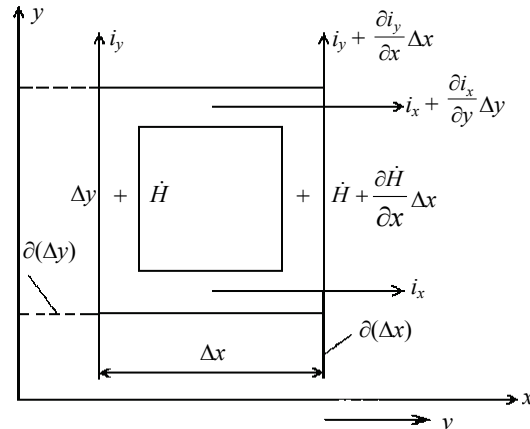


Рис. 3. Элементарная прямоугольная площадка со сторонами Δx и Δy
Fig. 3. Elementary rectangular platform with sides Δx and Δy

Напряженность магнитного поля $\dot{H}_1$ в некоторой точке (x, y) i -го участ-
ка поверхности полого ротора вычисляется как

$$\dot{H}_1 = \dot{H}_{1,i} + \dot{H}_{\Sigma,i}, \quad (1)$$

где $\dot{H}_{\Sigma,i}$ – напряженность от токов в элементарном участке ротора.

На основании первого уравнения Максвелла падение напряжения от
вихревых токов i_x, i_y в трубке по контуру элементарного участка поверхно-

сти ротора уравнивается ЭДС трансформации и движения, наведенными результирующим полем. Получаем уравнение Кирхгофа в дифференциальной форме

$$\frac{\partial i_y}{\partial x} - \frac{\partial i_x}{\partial y} = -j\omega_1 \mu_0 \gamma_s \dot{H}_1 - \omega_1 s \frac{\tau}{\pi} \mu_0 \gamma_s \frac{\partial \dot{H}_1}{\partial x}, \quad (2)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота; f_1 – частота питающей сети; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; γ_s – удельная электропроводность материала ротора; s – скольжение.

Для определения i_y , i_x и $\dot{H}_1$ необходимо получить соотношения, связывающие эти величины. Для этого на рис. 4 показана часть машины в районе воздушного зазора, вырезанная по направлению осей координат.

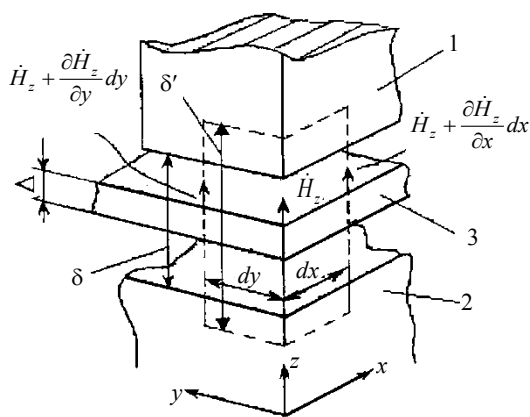


Рис. 4. Часть машины в районе воздушного зазора

Fig. 4. Part of the electric machine in the area of the air gap

На основании закона полного тока для элементарного участка поверхности полого ротора справедливы следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \dot{H}_{\alpha 1, i}}{\partial x} &= -\frac{\Delta}{\delta'} i_y; \\ \frac{\partial \dot{H}_{\alpha 1}}{\partial y} &= -\frac{\Delta}{\delta'} i_x; \\ \delta' &= k_{\delta} (\delta_0 + \Delta), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где k_{δ} – коэффициент Картера при односторонней зубчатости; Δ – толщина стакана полого ротора; δ_0 – конструктивный зазор; δ' – расчетный воздушный зазор.

Для всех областей элементарного участка справедлив закон непрерывности тока

$$\operatorname{div} i = \frac{\partial i_y}{\partial y} - \frac{\partial i_x}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

На основании (2) для областей лобовых частей, где полагаем $\dot{H}_{\delta i} = 0$, справедливо уравнение

$$\frac{\partial i_y}{\partial x} - \frac{\partial i_x}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Преобразуем (2) с учетом (1), (3)–(5). Переходя к конечным разностям по координате X для области, соответствующей активной длине машины, окончательно получаем

$$\frac{\partial^2 i_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 i_y}{\partial y^2} - k_1 \alpha \frac{\partial i_y}{\partial x} k_2' \alpha^2 i_y = C_{1,i}, \quad (6)$$

где

$$k_1 = \frac{\xi_0(1-s)\Delta}{\delta'}; \quad \xi_0 = \frac{\mu_0 \gamma_3 \omega_1 s \tau^2}{a^2}; \quad k_2 = \frac{j \xi_0 \Delta}{\delta'};$$

$$C_{1,i} = \frac{-(\dot{H}_{1,i+1} - \dot{H}_{1,i-1})(\xi_0(1-s)\alpha + j2t_z \alpha^2 \xi_0)}{(4t_z)^2}.$$

Для участка, соответствующего шагу дискретности модели, в рабочем зазоре имеют место следующие граничные условия:

1) за пределами полого ротора $\gamma_3 = 0$, то есть

$$y = \pm \frac{L'}{2}; \quad i_y = 0; \quad (7)$$

2) функции i_x, i_y являются непрерывными

$$y = \pm \frac{L'}{2}; \quad i_{yI} = i_{yII}; \quad i_{xI} = i_{xII}; \quad (8)$$

3) распределение тока в изотропной активной области I длиной L симметрично относительно оси X , при этом касательные линии токов в точках $y = 0$ являются прямыми, параллельными оси Y :

$$y = 0; \quad i_{xI} = 0. \quad (9)$$

В результате аналитического решения уравнений (5), (6) с учетом граничных условий (7)–(9) получим окончательные выражения для составляющих плотности токов в активной (I) области i -го участка поверхности полого ротора:

$$i_{yI} = \frac{C_{1,i} \left(\operatorname{ch}(\sqrt{k_2} \alpha y) - \operatorname{ch}(\Lambda') - B' \operatorname{sh}(\Lambda') \right)}{k_2 \alpha^2 \left(\operatorname{ch}(\Lambda') + B' \operatorname{sh}(\Lambda') \right)}; \quad (10)$$

$$i_{\text{л}} = -\frac{C_{1,i}\Delta x \cdot \text{sh}(\sqrt{k_2}\alpha y)}{\sqrt{k_2}\alpha(\text{ch}(\Lambda') + B'\text{sh}(\Lambda'))}, \quad (11)$$

$$\text{где } \Lambda' = \frac{\sqrt{k_2}\alpha L}{2}; \quad B' = \frac{\sqrt{k_2}\alpha(L' - L)}{2}.$$

Для определения геометрии окон, расположенных в пределах части активной длины пакета статора в области, примыкающей к сплошному «лобовому» участку поверхности стакана со стороны его торца, противоположного дну стакана ротора, воспользуемся следующим подходом.

Приравняв (10) и (11), получаем следующее уравнение относительно y :

$$\cos(j\sqrt{k_2}\alpha y') - j\sqrt{k_2}\alpha\Delta x \cdot \sin(j\sqrt{k_2}\alpha y') = \text{ch}\Lambda' + B'\text{sh}\Lambda'. \quad (12)$$

Введем следующие обозначения:

$$U = A\sin(\omega t + \varphi) = a\sin(\omega t) + b\cos(\omega t), \quad (13)$$

$$\text{где } A = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{b}{a}.$$

Полагаем

$$y' \equiv t, \quad (14)$$

тогда:

$$\left. \begin{aligned} \omega &\equiv j\sqrt{k_2}\alpha; \\ \alpha &= 1; \\ b &= -j\sqrt{k_2}\alpha\Delta x; \\ a &= \sqrt{1 - k_2\alpha^2\Delta x^2}; \\ \varphi &= \arctg(-j\sqrt{k_2}\alpha\Delta x). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

После подстановки (13)–(15) в (12) и соответствующих преобразований получаем

$$y' = \frac{\arcsin\left(\frac{\sqrt{1 - k_2\alpha^2\left(\frac{L' - L}{2}\right)^2} \sin P}{\sqrt{1 - k_2\alpha^2\Delta x^2}}\right) - \arctg D}{j\sqrt{k_2}\alpha}, \quad (16)$$

$$\text{где } P = j\sqrt{k_2}\alpha \frac{L}{2} + \arctg\left(-j\sqrt{k_2}\alpha \frac{L' - L}{2}\right); \quad D = -j\sqrt{k_2}\alpha\Delta x.$$

В инженерной практике необходимо применять достаточно простые выражения, связывающие конструктивные размеры электрической машины, которые позволяют с достаточной степенью точности определять их значения. Также нужно стремиться к тому, чтобы физический смысл используемых соотношений был предельно ясен.

Руководствуясь сказанным выше, упростим выражение (16). Параметр Δx соответствует шагу дискретности по оси X в модели. Если шаг стремится к нулю ($\Delta x \rightarrow 0$) и вылет ротора за пределы расчетной длины статора достаточно мал $\left(\frac{L' - L}{2} \rightarrow \xi\right)$, то выполняются следующие предельные соотношения:

$$\sqrt{1 - k_2 \alpha^2 \Delta x^2} \rightarrow 1; \quad (17)$$

$$\arctg(-j\sqrt{k_2} \alpha \Delta x) \rightarrow 0. \quad (18)$$

Так как $\frac{L' - L}{2} \rightarrow \xi$, то

$$\left(\frac{L' - L}{2}\right)^2 \rightarrow 0. \quad (19)$$

При этом

$$\sqrt{1 - k_2 \alpha^2 \left(\frac{L' - L}{2}\right)^2} \rightarrow 1. \quad (20)$$

С учетом двух последних предельных соотношений получаем

$$y' = \frac{L}{2} - \frac{1}{j\sqrt{k_2} \alpha} \cdot \arcsin \left(\frac{j\sqrt{k_2} \alpha \frac{L' - L}{2}}{\sqrt{1 - k_2 \alpha^2 \left(\frac{L' - L}{2}\right)^2}} \right). \quad (21)$$

На основании (19) знаменатель аргумента обратной тригонометрической функции в (21) стремится к 1.

Если $\frac{L' - L}{2} \rightarrow \xi$, то $j\sqrt{k_2} \alpha \frac{L' - L}{2} \rightarrow \sigma$, где σ – достаточно малая величина

$$\arcsin\left(j\sqrt{k_2}\alpha\frac{L'-L}{2}\right) \rightarrow j\sqrt{k_2}\alpha\frac{L'-L}{2}. \quad (22)$$

Окончательно получаем

$$y' = L - \frac{L'}{2}. \quad (23)$$

Рассмотрим интервал $y' \leq y_1 \leq L/2$.

Для всех y_1 из этого интервала выполняется следующее соотношение:

$$i_{x1} \geq i_{y1}. \quad (24)$$

Таким образом, определена часть активной области ротора y' , где преобладают составляющие тока вдоль оси X . Данная часть области выполняет функции лобовых частей ротора.

Найдем аксиальный размер окна

$$L_0 = \frac{L}{2} - y' = \frac{L'-L}{2}. \quad (25)$$

В системе принятых допущений оказывается, что длина окна равна длине вылета ротора за пределы расчетной длины статора.

Окна в роторе выполняются в зоне, примыкающей к сплошному «лобовому» участку поверхности стакана ротора со стороны его торца, противоположного дну стакана ротора в аксиальном направлении от окружности, соответствующей краю пакета статора, в глубь активной длины ротора на величину L_0 . Число окон Z_0 целесообразно выбирать достаточно близким к числу зубцов статора, $Z_0 < Z_1$. Ширина окна b_0 зависит от технологических факторов и выбирается минимальной.

По мере увеличения скорости вращения благодаря наличию окон со стороны одного торца ротора и влиянию дна стакана с другого элементарные токи ротора в пределах активной длины расточки машины будут направлены преимущественно в аксиальном направлении, в том числе при сравнительно малых скольжениях, соответствующих малым частотам перемагничивания материала ротора. То есть часть активной поверхности ротора со стороны торца, противоположного дну его стакана, не будет выполнять функции лобовой части обмотки при снижении частоты токов в материале ротора. Это обеспечивает увеличение активной составляющей тока ротора, пропорциональной электромагнитному моменту двигателя. Соответственно лобовые части эквивалентной обмотки полого ротора, токи через которые не создают момент, не будут распространяться на высоких скоростях вращения в область активной длины машины.

ВЫВОДЫ

1. На основании аналитического решения для распределения плотности вихревых токов в пределах участка полого ротора, соответствующего зубцовому делению статора, получены выражения, позволяющие определить рациональное соотношение между длиной вылета гильзы ротора и длиной окон в его торцевых частях, а также их координаты относительно пакета статора.

2. В настоящее время существует актуальная задача в систематизации поиска конструктивных решений управляемых асинхронных микромашин с рядом свойств, зависящих от особенностей их применения в современных технических системах, обобщении результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также повышении качества и сокращения сроков проектных разработок, что предполагает создание уточненных математических моделей и разработку эффективных алгоритмов задач проектирования.

Список обозначений

L' – аксиальная длина полого ротора;
 L – активная длина ротора, соответствующая длине пакета статора;
 τ – полюсное деление;
 t_z – зубцовое деление статора, соответствует шагу разбиения поверхности ротора на участки, в пределах которых ищутся аналитические выражения для расчета всех параметров;
 i_x, i_y – составляющие вихревых токов ротора по осям x и y ;
 $\dot{H}_{1,i}$ – напряженность, определяемая эквивалентным током обмотки статора на зубцовом делении;
 $\dot{H}_1$ – то же магнитного поля в некоторой точке (x, y) поверхности полого ротора;
 $\dot{H}_{\Sigma 1,i}$ – то же магнитного поля от токов в i -м элементарном участке ротора;
 $H_{1,i+1}$ – то же от токов в $i + 1$ -м элементарном участке ротора;
 $H_{1,i-1}$ – то же от токов в $i - 1$ -м элементарном участке ротора;
 i_{yI}, i_{xI} – составляющие плотности токов в активной области I для i -го участка поверхности ротора;
 j – мнимая единица
 ξ – бесконечно малая величина
 Δx – шаг дискретности по оси X в модели.
Остальные величины – это промежуточные параметры и переменные, введенные для сокращения записи:

$$\alpha = \pi/\tau; \quad k_1 = \xi_0(1-s)\Delta/\delta'; \quad k_2 = j\xi_0\Delta/\delta'; \quad \xi_0 = \mu_0\gamma_2\omega_1/\alpha^2;$$

$$C_{1,i} = -(\dot{H}_{1,i+1} - \dot{H}_{1,i-1})(\xi_0(1-s)\alpha + j2t_z\alpha^2\xi_0)/(4t_z^2); \quad \Lambda'; B'; A; \varphi.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеев, П. С. Электрические машины / П. С. Сергеев. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. С. 142.
2. Вевюрко, И. А. К расчету характеристик двухфазной индукционной машины с полым ротором / И. А. Вевюрко // ВЭП. 1957. № 6. С. 34–39.
3. Каасик, П. Б. Асинхронные индукторные микродвигатели устройств автоматики / П. Б. Каасик, И. В. Блинов. Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. 153 с.

4. Лопухина, Е. М. Исследование соотношений размеров и параметров оптимизированных асинхронных исполнительных микродвигателей / Е. М. Лопухина, А. Б. Захаренко, Е. Н. Тараненко // *Электротехника*. 1997. № 4. С. 12–18.
5. Анненков, А. Н. Пути повышения эксплуатационных и технических характеристик индукционных микромашин с полым ротором / А. Н. Анненков, С. В. Сизиков, А. И. Шиянов // *Анализ и проектирование средств роботизации и автоматизации: межвуз. сб. науч. трудов*, Воронежский ГТУ, Междунар. ун-т компьютер. технологий. Воронеж, 1999. С. 88–91.
6. Литой сплав на основе железа: а. с. 240262 (СССР) / А. Н. Стрельников, В. А. Михайлиди. Опубл. 26.03.1969. Бюл. № 12.
7. Асинхронный исполнительный двигатель: пат. 2026597 Россия, МКИ⁶ Н 02 К 17/16 / Ю. П. Клушин, М. Ф. Хлыстов. № 5019415/07; заявл. 29.12.1991; опубл. 10.01.1995. Бюл. № 1.
8. Сизиков, С. В. Асинхронные исполнительные микродвигатели с распределенными параметрами ротора для устройств авиационного оборудования / С. В. Сизиков. Воронеж: Воронежский ГТУ, Воронеж. воен. авиацион. инж. ин-т, 2001. 184 с.
9. Асинхронный двигатель с полым ротором: пол. решение № 2003105570/09 (005913) по заявке на пат. № 2232460 Рос. Федерации от 26.02.2003, МПК Н 02к 17/02, 17/16 / А. Н. Анненков, А. И. Шиянов.
10. Анненков, А. Н. Асинхронные двигатели с токопроводящим слоем материала ротора / А. Н. Анненков, С. В. Сизиков, А. И. Шиянов. Минск: УП «Ризондис», 2004. 234 с.

Поступила 28.03.2017 Подписана в печать 25.05.2017 Опубликовано онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Sergeev P. S. (1955) *Electric Machines*. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 142 (in Russian).
2. Vevyurko I. A. (1957) Towards Calculation of Characteristics of Two-Phase Induction Machine with a Hollow Rotor. *Vestnik Elektromyashlennosti* [Herald of Electrical Industry], (6), 34–39 (in Russian).
3. Kaasik P. B., Blinov I. V. (1982) *Asynchronous Induction Motors of Automation Devices*. Leningrad: Energoizdat Publ. 153 (in Russian).
4. Lopukhina E. M., Zakharenko A. B., Taranenko, E. N. (1997) Study of the Correlation of Dimensions and Parameters of Optimized Asynchronous Actuating Micro-Motors., *Elektrotekhnik* [Electrical engineering], (4), 12–18 (in Russian).
5. Annenkov A. N., Sizikov S. V., Shiyanov A. I. (1999) Ways of Amending Operational and Technical Characteristics of Induction Micromachines with a Hollow Rotor. *Analysis and Design of Robotics and Automation: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Voronezh, Voronezh State Technical University, International University of Computer Technologies, 88–91 (in Russian).
6. Strel'nikov A. N., Mikhailidi V. A. (1969) *Cast Iron-Based Alloy*. Author's Certificate No 240262 USSR (in Russian).
7. Klushin Yu. P., Khlystov M. F. (1995) *Asynchronous Executive Engine*. Patent 2026597 Russia (in Russian).
8. Sizikov S. V. (2001) *Executive Asynchronous Motors with Distributed Parameters of the Rotor Devices to Aviation Equipment*. Voronezh. 184 (in Russian).
9. Annenkov A. N., Shiyanov A. I. (2004) *Asynchronous Motor with a Hollow Rotor*. Patent No 2232460 Russian Federation of 26.02.2003 (in Russian).
10. Annenkov A. N., Sizikov S. V., Shiyanov A. I. (2004) *Asynchronous Motors with a Conductive Layer of the Rotor Material*. Minsk, Risondis Publ. 234 (in Russian).

Received: 28 March 2017

Accepted: 25 May 2017

Published online: 30 March 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-141-158

УДК 69.059.7

Некоторые особенности энергопотребления в современных жилых зданиях

С. Н. Осипов¹⁾, А. В. Захаренко¹⁾, С. А. Данилевский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. За последние 20 лет в странах бывшего СССР произошли существенные изменения в требованиях к жилищным условиям у покупателей жилья. Кроме этого, появились новые материалы и строительные изделия, например для герметичных окон и балконных дверей. Значительно увеличилось количество пустующих квартир с выключенным в зимнее время отоплением, что может вызвать конденсацию влаги на поверхностях межквартирных перегородок и образование плесени. При этом требования к уменьшению энергопотребления постоянно растут, что особенно явно проявляется в нормативном повышении значений термических сопротивлений ограждающих здания конструкций и увеличении интереса к использованию вторичных энергоресурсов, получаемых из воздуха и стоков отработанной воды. В статье описан способ предотвращения конденсации влаги на ограждениях смежных помещений с разной температурой воздуха, содержащих системы отопления и использования вторичной теплоты удаляемого из помещения отработанного воздуха. Для обеспечения быстрого аварийного подключения внутридомовых систем теплогазоснабжения к наружным передвижным источникам теплоты и газа рекомендуется дополнительно устанавливать специальные отводы с соединительными устройствами в специальных теплоизолированных нишах в стенах или других частях зданий с учетом возможности размещения вблизи наружных передвижных источников теплоты и газа. В случае отопления здания крышной газовой котельной или поквартирными отопителями, питаемыми газом, по стене дома прокладывают единый газопровод (коллектор), оборудованный дополнительным устройством для подключения аварийного газоснабжения. Для уменьшения удельного расхода теплоты на отопление зданий рекомендуется при модернизации и реконструкции увеличивать полезный объем зданий и улучшать их формы различными способами, в том числе путем объединения двух или более соседних малоэтажных зданий в одно вторичное здание с повышением этажности, с уширением с любой или с каждой стороны. Размеры реконструируемого здания принимают максимально возможными, а их пропорции (при любом количестве объединяемых зданий) – обеспечивающими стремление формы к шаровой, или равноцилиндрической, или кубической при любом их сочетании.

Ключевые слова: современное жилье, пустующие помещения, влаговыведение на перегородках, аварийное теплогазоснабжение, реконструкция зданий, уменьшение теплопотребления

Для цитирования: Осипов, С. Н. Некоторые особенности энергопотребления в современных жилых зданиях / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко, С. А. Данилевский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 141–158. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-141-158

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing –
NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Some Specific Features of Energy Consumption in Modern Residential Buildings

S. N. Osipov¹⁾, A. V. Zakharenko¹⁾, S. A. Danilevskii¹⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Over the past 20 years there have been significant changes in the customer requirements for housing in the countries of the former USSR. Besides, new materials and construction products, such as the ones for sealed windows and balcony doors have appeared in the market. The number of vacant flats with the heating off in the winter significantly increased that may cause condensation on the surfaces of interroom partitions and the formation of mold. Meanwhile, the requirements for lower energy consumption are constantly increasing, that is especially pronouncedly manifested in the growth of normative values of thermal resistance of enclosing structures of buildings and in the increased interest in the use of secondary energy resources extracted from the air and effluent wastewater. The present article describes the method to prevent moisture condensation on the fencing of adjacent premises with different temperatures containing heating systems and the use of waste heat removed from the room exhaust air. For quick emergency switching of in-house systems of heat and gas supply to outdoor mobile sources of heat and gas it is recommended to install special taps with connectors insulated in special niches in the walls or other parts of buildings considering the possibility of placing them close to the outer mobile sources of heat and gas. In the case of heating the building with the aid of a roof gas boiler or by door-to-door heaters fueled by gas, a single pipeline (collector), equipped with an additional device for the connection of emergency gas supply is being put along the wall. In order to reduce specific heat consumption for heating of buildings it is recommended to increase the net enclosure volume of buildings and to improve their form in various ways, including by combining two or more adjacent low-rise buildings in one secondary building with increasing height and with the broadening of either or each side for modernization and reconstruction. The dimensions of the reconstructed building are accepted as the maximum possible, and their proportions (in any number of merged buildings) – as providing tend of shapes to spherical or equicylindrical, or cubic – in any combination.

Keywords: modern housing, empty premises, moisturizing of partitions, emergency heat and gas supply, reconstruction of buildings, heat consumption reducing

For citation: Osipov S. N., Zakharenko A. V., Danilevskii S. A. (2018) Some Specific Features of Energy Consumption in Modern Residential Buildings. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2), 141–158. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-141-158 (in Russian)

Современный рынок жилья требует строительства квартир под заказ с учетом требований жильцов относительно объемно-планировочных решений, их оснащения системами жизнеобеспечения, качества отделки и других свойств. Создание энергосберегающего, безопасного и комфортного жилья предполагает разработку нового поколения систем жизнеобеспечения [1].

Одна из основных проблем развития современных городов – дефицит территорий под новое строительство, в связи с чем актуальными принципами формирования городской застройки являются возведение зданий повышенной этажности, а также комплексная реконструкция существующего жилищного фонда. Следует отметить неоднозначное отношение жителей городов к подобным подходам. Например, еще 10 лет тому назад было вы-

явлено, что только около четверти москвичей согласны жить в 25-этажных домах и выше [2], и причины такого отношения к высотным домам понятны: мусоропроводы, лифты, шумность, опасность срочной эвакуации и т. п.

При существенном повышении требований к качественным показателям нового жилья за последние 10 лет заметного уменьшения вероятностей ошибок при его возведении не происходит. Так, вероятности ошибок при проектировании достигают 0,2–0,4 [3, рис. 1] и 0,04–0,25 [3, табл. 1]. Вероятности ошибок при строительстве составляют 0,5–0,6 [3, рис. 1] и 0,44–0,67 [3, табл. 1], а вероятности дефектности материалов 0,05–0,20 [3, рис. 1] и 0,15–0,23 [3, табл. 1].

Характерной иллюстрацией приведенных величин является сравнительная оценка фактических и расчетных (проектных) шести значений сопротивления теплопередаче теплоизоляционных материалов в конструкции стен [4, рис. 1], которая показывает, что средняя фактическая величина в 1,47 меньше расчетной. При этом коэффициент вариации составляет $K_v = 0,245$, что при вероятности реализации 5 % позволяет допустить двукратное уменьшение фактического значения сопротивления теплопередаче теплоизоляционных материалов по сравнению с расчетным. Подобное различие в значениях расчетных и фактических величин сопротивления теплопередаче ($3,84/2,53 = 1,53$) наружных стен наблюдается в экспериментальном многоквартирном здании, построенном в агрогородке Парафьяново Докшицкого района Витебской области [5, табл. 1].

В последнее время особенно обострилась ситуация с обеспечением нормальной вентиляции жилых помещений, оборудованных новыми герметичными окнами, что порождает массовые жалобы жильцов [6, с. 58]. При этом влажность воздуха повышается до 70–80 %, а часто до 90 %, что приводит к выпадению влаги и появлению плесени на внутренней поверхности наружных стен, особенно в угловых частях.

В связи с развитием рыночных отношений увеличилось количество жилых помещений, которые являются предметом вложения капитала и в которых зачастую никто не живет, в связи с чем владельцы отключают отопление. Другой причиной отключения отопления в одной или нескольких комнатах квартиры может быть необходимость экономии оплаты. Известны расчетные температуры и кратности обмена воздуха в помещениях жилых зданий [7, с. 106], среди которых кухни (15 °C), лестничные клетки (15 °C), мусорные камеры (5 °C). Также в [7] приведены расчетные температуры и кратности обмена воздуха для помещений в зданиях иных назначений. Основным недостатком упомянутых расчетных нормативных значений температур того периода является отсутствие учета вариантов недопустимого преднамеренного понижения температуры хозяевами жилых помещений, связанного с вышеупомянутыми причинами.

Известны аналогичные современные нормативы температуры в жилых и вспомогательных помещениях, например в ТКП 45-3.02-108–2008 (02250) [8, с. 31], где сказано, что в холодный период года в жилых помещениях,

когда они не используются, допускается снижение температуры воздуха ниже нормируемой, но не ниже, чем для жилых помещений гостиниц, 16 °С. Здесь же для помещений других назначений приведены температуры не ниже 12 и 5 °С. По аналогии с гостиницами, для неиспользуемых жилых помещений, вероятно, следует также принимать расчетную температуру 16 °С. Эти рекомендации наиболее близко подходят к предлагаемому способу.

Основные недостатки приведенных материалов – повышенный расход тепловой энергии для отопления неиспользуемых помещений в зданиях и возможность конденсации влаги на поверхностях перегородок, обращенных к смежным используемым помещениям с более высокой температурой. Задачей является обеспечение условий для предотвращения конденсации влаги на ограждениях смежных помещений с более низкой температурой воздуха в зданиях, снабженных системами отопления и средствами использования вторичной теплоты удаляемого из помещения отработанного воздуха. При этом определяется величина возможного снижения температуры воздуха в смежных помещениях, имеющих общие перегородки с рассматриваемыми.

В целом поставленная задача решается достижением технического результата посредством способа предотвращения конденсации влаги на ограждениях смежных помещений, заключающегося в том, что:

- определяют нижний предел допустимого значения снижения температуры $t_{\text{пр}}$ в более холодных помещениях;
- при температуре воздуха t_x в более холодном помещении выше предельной $t_x > t_{\text{пр}}$ обеспечивают индивидуально устанавливаемую потребителем подачу количества теплоты, расходуемой на отопление помещения;
- при температуре воздуха t_x в более холодном помещении ниже либо равной предельной температуре $t_x \leq t_{\text{пр}}$ обеспечивают автоматически регулирующую подачу количества теплоты, расходуемой на отопление помещения, в зависимости от климатических условий и температур воздуха в смежных помещениях; при этом обеспечивают среднюю расчетную температуру $t_{\text{ср}}$ воздуха в смежных теплых помещениях, а температуру t_x воздуха в холодном помещении определяют из выражения [9, с. 5]

$$t_x = 2t_{\text{ср}} - \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{см}} i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (1)$$

где t_x – температура воздуха в холодном помещении, °С; $t_{\text{см}}$ – температура воздуха в смежных теплых помещениях, °С; $t_{\text{ср}}$ – средняя расчетная температура (15 °С), °С; S_i – площадь поверхности перегородок со смежными теплыми помещениями, м²; $i = 1, \dots, n$; n – количество смежных помещений.

Таким образом, сущность описываемого способа заключается в установлении минимально допустимой температуры в более холодном (неиспользуемом) помещении, при которой на поверхностях перегородок, обращенных к смежным более теплым (используемым) помещениям с предельной нормативной относительной влажностью 60 % (что примерно соответствует полному насыщению воздуха при температуре менее 10 °C [7, рис. 11] в условиях наружной атмосферы), не будет происходить конденсация влаги. При этом общее количество теплоты, расходуемой на отопление жилого помещения, разделяют на индивидуально устанавливаемое потребителем и автоматически регулируемое в зависимости от внешних климатических условий и температур воздуха в смежных более теплых помещениях, средняя величина которых является определяющей величиной для холодного помещения.

Следует учитывать, что влагосодержание воздуха с относительной влажностью $W = 60\%$ и температурой $t_r = 20\text{ °C}$ составляет $d = 9\text{ г/кг}$ [7], что соответствует $t = 12\text{ °C}$ для полного насыщения и выпадения влаги на поверхности перегородки. При создании значительного запаса температуры до возможной конденсации влаги можно упростить определение допустимого понижения температуры в жилом помещении при отсутствии существенного влияния на смежные жилые помещения.

В качестве определяющего параметра рекомендуется применять среднюю расчетную температуру, определяемую как средневзвешенную суммарную по площади всех окружающих холодное помещение «горячих» перегородок (смежных с теплыми помещениями) температуру воздуха между теплым и холодным помещениями, согласно (1). Если принять $t_{cp} = 15\text{ °C}$, то получим

$$t_x + \frac{\sum_{i=1}^n t_{cm} i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \\ 15\text{ °C} \leq \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{2}. \quad (2)$$

Такая средняя температура при реальном квазистационарном (медленно изменяющемся) тепловом режиме практически соответствует центральной части по толщине межкомнатной перегородки [10]. Температура поверхности перегородки, обращенной к теплomu помещению, в любом случае $t_r > 15\text{ °C}$, что обеспечивает отсутствие условий для конденсации влаги.

При температуре $t > 15\text{ °C}$ и нормативной температуре воздуха в теплых помещениях 18–20 °C температура воздуха в холодном помещении составляет 10–12 °C, что примерно соответствует нижнему пределу допустимого снижения температуры t_{np} в общественных и административно-бытовых помещениях [8, с. 31]. Таким образом, индивидуальное регулирование температуры воздуха в жилом помещении посредством индивидуально устанавливаемой потребителем подачи количества теплоты, расходуемой

на отопление помещения, допускается при $t > t_{\text{пр}}$ (или $t > (10-12) ^\circ\text{C}$), а начиная с этого значения, т. е. при $t < t_{\text{пр}}$, температура должна поддерживаться автоматически в зависимости от климатических условий и температур воздуха в смежных помещениях посредством автоматически регулируемой подачи количества теплоты, расходуемой на отопление помещения. Описанный способ предотвращения конденсации влаги запатентован в Евразийском патентном ведомстве [11].

В качестве примера далее приведен расчет минимальной температуры воздуха в квартире со следующими параметрами: геометрические размеры $11 \times 6 \times 2,8$ м (длина $\times$ ширина $\times$ высота); площади поверхностей перегородок между смежными помещениями S_i : лестничным помещением $S_1 = 6 \cdot 2,8 = 16,8 \text{ м}^2$ при $t = 12 ^\circ\text{C}$; соседней теплой квартирой по длине $S_2 = 11 \cdot 2,8 = 30,8 \text{ м}^2$ при $t = 19 ^\circ\text{C}$; соседней теплой квартирой в торце $S_3 = 16,8 \text{ м}^2$ при $t = 20 ^\circ\text{C}$; ниже расположенной теплой квартирой через потолок $S_5 = 11 \cdot 6 = 66 \text{ м}^2$ при $t = 20 ^\circ\text{C}$. Учитывая, что температура воздуха в лестничном помещении примерно соответствует температуре в холодной квартире t_x , теплообмен между ними не учитываем, т. е. S_1 исключается из расчетов. Тогда при средней температуре $t_{\text{ср}} = 15 ^\circ\text{C}$ в соответствии с (1)

$$t_x = 30 - \frac{S_2 t_2 + S_3 t_3 + S_4 t_4 + S_5 t_5}{S_2 + S_3 + S_4 + S_5} =$$

$$= 30 - \frac{30,8 \cdot 19 + 16,8 \cdot 20 + 66 \cdot 18 + 66 \cdot 20}{30,8 + 16,8 + 66 + 66} = 30 - 19,1 = 11 ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

Существенный интерес представляет оценка величины возможного поступления теплоты от окружающих холодное помещение теплых перегородок в прилегающих нормально отапливаемых квартирах. Для таких расчетов используем упрощенную зависимость, приведенную в [9, с. 10] в виде

$$Q_i = \frac{S_i (t_p - t_i)}{R_i} (1 + \sum \beta) n, \quad (4)$$

где Q – тепловой поток, Вт; S_i – расчетная площадь ограждения, м^2 ; t_p – расчетная температура воздуха в помещении, $^\circ\text{C}$; t_i – температура воздуха в смежном помещении или снаружи, $^\circ\text{C}$; R_i – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; β , n – коэффициенты, зависящие от добавочных тепловых потоков и положения наружной поверхности ограждения.

Для ориентировочных расчетов принимаем: $\beta = 0$ и $n = 1$, а для внутренних перегородок со смежными теплыми квартирами принимаем следующие значения R_i : вертикальных перегородок $R_2 \approx 0,6 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ и $R_3 \approx 0,6 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; пола $R_4 \approx 1,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ и потолка $R_5 \approx 1,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Площадь наружного ограждения (стена и окна) составляет $S_6 = 30,8 \text{ м}^2$, в том числе площадь окон – 25 % общей площади наружного ограждения. При сопро-

тивлении теплопередаче наружной стены $R_7 \approx 3,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ и окон $R_8 \approx 1,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ приведенное к общему наружному ограждению $R_6 \approx 2,65 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Тогда поток теплоты через наружное ограждение при уличной температуре $t_n = (-25) ^\circ\text{C}$ с учетом 5%-й вероятности возможного двукратного уменьшения R_6 составляет

$$Q_{x.o} = \frac{30,8 \cdot [11 - (-25)]}{2,65/2} = 0,84 \text{ кВт}. \quad (5)$$

При минимальном уровне вентиляции с коэффициентом обмена воздуха $K_{ов} = 0,5$, что рекомендовано [7, с. 116] для складов, кладовых и т. п., количество поступающего воздуха в «холодную» квартиру составит примерно $V_x \approx 100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Тогда затраты теплоты на вентиляцию $Q_{x.в} \approx 1,4 \text{ кВт}$, что определяет общий расход теплоты $\Sigma Q_x \approx 2,24 \text{ кВт}$. Приход теплоты от теплых ограждающих квартир составляет

$$\Sigma Q_o = \frac{30,8 \cdot (19 - 11)}{0,6} + \frac{16,8 \cdot (20 - 11)}{0,6} + \frac{66 \cdot (18 - 11)}{1,0} + \frac{66 \cdot (20 - 11)}{1,0} \approx 1,7 \text{ кВт}. \quad (6)$$

Таким образом, при использованных значениях R_i для обеспечения расчетной температуры воздуха в «холодной» квартире $11 ^\circ\text{C}$ необходимо затрачивать на отопление около $0,54 \text{ кВт}$, что составляет примерно 24,1 % от необходимого расхода теплоты.

Учитывая прямую пропорциональность теплового потока от разности температур уже при наружной температуре около $-12 ^\circ\text{C}$ и выше, «холодная» квартира не нуждается в дополнительном отоплении.

В связи с высокими вероятностями ошибок при проектировании и строительстве новых и большим износом действующих систем теплогазоснабжения старых зданий зачастую возникают проблемы функционирования этих систем, особенно в зимнее время. Изложенное далее предложение [12] предусматривает создание технических возможностей для быстрого использования передвижных автономных источников теплогазоснабжения, позволяющих предотвращать переселение значительного количества людей из неотапливаемых зданий в теплые помещения при низких наружных температурах, приводящих к замораживанию систем отопления. Подтверждением полезности предлагаемых устройств являются известные случаи ежегодного выхода из строя каких-либо участков сетей теплоснабжения крупных городов в периоды достаточно сильных морозов, когда приходится переселять сотни людей из замерзающих зданий в отапливаемые помещения.

В известных нормативных документах [13, 14] ничего не сказано о необходимости сооружения даже в крупных жилых домах специальных устройств для быстрого (в течение 6–12 ч) перевода систем отопления и газоснабжения при использовании домовых генераторов теплоты на аварийные передвижные источники теплоты и газа, отдельные образцы которых уже нашли практическое применение в аварийных ситуациях.

Известен способ подогрева помещений в холодное время года горячим воздухом, для чего служит передвижной теплогенератор [15] и ему подобные «тепловые пушки». Главным недостатком такого способа обогрева помещений (квартир) многоэтажных домов является трудность доставки этого воздуха в помещения, для чего необходима прокладка специальных воздухопроводов по всему дому, так как простая подача горячего воздуха с предельной температурой около 25 °С в помещения и подъезды первого этажа не может прогреть необходимые помещения на всех этажах хотя бы до 15 °С при наружных температурах ниже $-(5-10)$ °С. Кроме того, данный способ не гарантирует предотвращения замораживания отдельных элементов системы водяного отопления при зависимой схеме присоединения к наружной тепловой сети, поскольку при аварии принудительная циркуляция теплоносителя прекращается.

Способ обустройства систем теплогазоснабжения зданий и сооружений в случае аварийного отключения наружных сетей теплогазоснабжения, по-видимому, должен предусматривать необходимость перевода людей в отапливаемые помещения на время устранения последствий аварий. Приведенные в [9, с. 17] схемы присоединения систем водяного отопления к тепловым сетям позволяют дополнить их устройствами для быстрого присоединения аварийных источников теплогазоснабжения. В [9, с. 659–662] при устройстве внутреннего газоснабжения жилых зданий и газоснабжения домовых (крышных) котельных также ничего не сказано об аварийных режимах газоснабжения.

Задачей является техническое обеспечение быстрого подключения аварийных источников теплоснабжения, а при необходимости и газа, путем сооружения специальных отводов и отключающих устройств, позволяющих восстановить функционирование системы отопления. Быстрота подключения аварийных источников теплогазоснабжения определяется сроками охлаждения и выхода из строя при аварии «штатных» систем теплогазоснабжения зданий. В зависимости от значения наружных низких температур воздуха она может составлять от 6 до 12 ч.

Поставленная задача решается достижением технического результата посредством способа реконструкции систем теплогазоснабжения здания, отличие которого в том, что в домовых системах теплогазоснабжения дополнительно устанавливают специальные отводы к наружным передвижным источникам теплогазоснабжения, обеспечивающие быстрое подключение и использование наружных передвижных источников тепло- или газоснабжения. Концы указанных отводов оборудуют соединительными устройствами, унифицированными с концами отводов на наружных передвижных источниках теплоты и газа. Таким образом, в начальной части отводов устанавливают запирающие устройства (кран, вентиль, задвижка, обратный клапан), а в конечной части отводов в целях безопасности – быстросъемные заглушки, при этом отводы обустраивают в легкодоступных местах с положительной температурой, для чего оборудуют специальные теплоизолированные ниши

в стенах или других частях зданий с учетом возможности размещения вблизи наружных передвижных источников теплогасоснабжения.

В случае отопления здания крышной газовой котельной, питаемой газом при помощи наружного газопровода, проложенного по стене дома [14, п. 7.21, с. 12–13], устройство для подключения аварийного газоснабжения устраивают в удобном месте на этой же стене. При этом в наружном газопроводе дополнительно устанавливают запорное устройство (если такового не имеется), препятствующее уходу газа при аварийном газоснабжении.

При реконструкции внутридомовой системы газоснабжения с установкой поквартирных отопителей и единого для всех подъездов отвода наружной сети газоснабжения в виде протяженного коллектора [16] устройство для подключения аварийного газоснабжения устанавливается в начале этого коллектора до ввода в первый подъезд по ходу газа.

В целом сущность предлагаемого способа заключается в том, что в домовых системах теплогасоснабжения при использовании газового общедомового отопления (крышные котельные) или газовых теплогенераторов устанавливают специальные устройства, обеспечивающие быстрое подключение и использование наружных источников теплоты и газа, как это показано на рис. 1, где приведены схемы подключения аварийных источников газоснабжения.

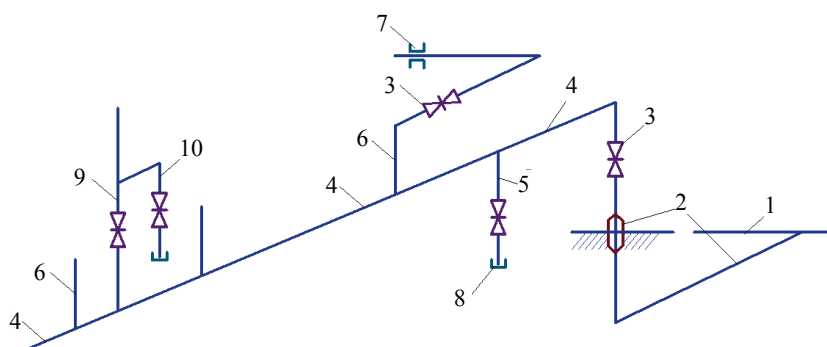


Рис. 1. Схема подключения аварийных источников газоснабжения:

- 1 – наружный распределительный газопровод низкого давления; 2 – отвод газопровода к дому с выводом на поверхность; 3 – кран или задвижка; 4 – протяженный газовый коллектор снаружи здания; 5 – аварийный отвод газопровода; 6 – отвод от коллектора в подъезд дома; 7 – ввод газопровода в дом; 8 – заглушка аварийного отвода от газового коллектора; 9 – газопровод в крышную котельную; 10 – аварийный отвод от газопровода для крышной котельной

Fig. 1. Wiring diagram for emergency sources of gas supply:

- 1 – outdoor distribution low-pressure gas pipeline; 2 – drain pipeline to the house exiting to the surface; 3 – valve or gate valve; 4 – elongated gas collector outside the building; 5 – emergency drain pipe; 6 – drain pipeline from the collector to the entrance of the house; 7 – entering the pipeline to the house; 8 – plug of the emergency withdrawal from the gas collector; 9 – gas pipeline to the roof boiler; 10 – emergency drain from the gas pipeline for roof boiler

В случае использования для отопления дома крышной котельной отвод от распределительного газопровода до котельной [14, п. 7.21] располагает-

ся на стене здания в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Сущность этого способа поясняется также при помощи принципиальных схем, изображенных на рис. 2, которые отображают варианты быстрого (аварийного) присоединения наружного источника теплоты как при независимых, так и при зависимых схемах подключения системы водоснабжения здания к тепловой сети.

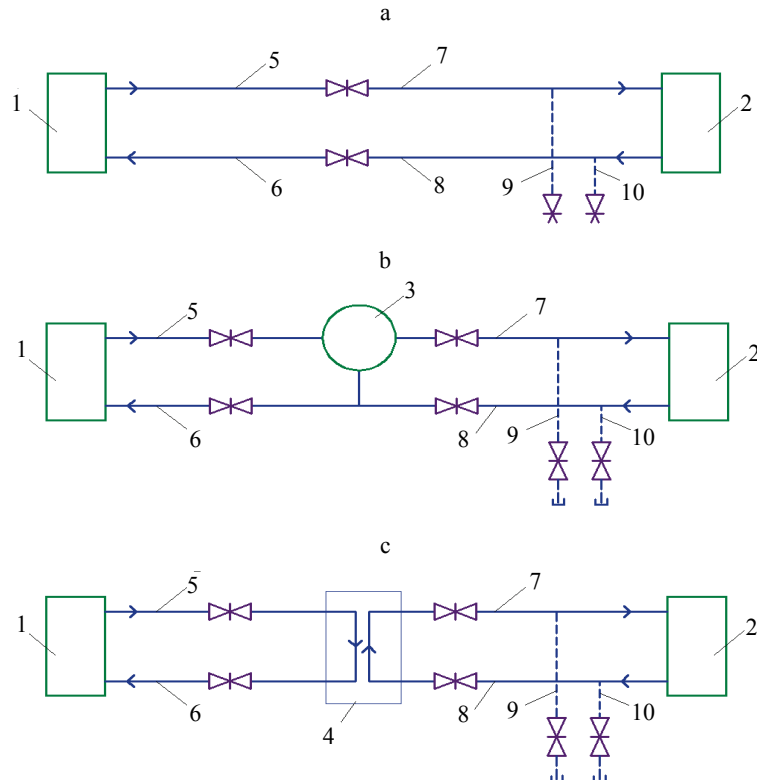


Рис. 2. Наиболее простые схемы быстрого (аварийного) присоединения наружного источника теплоты: а – схема непосредственного присоединения; б – схема присоединения с узлом смешения; с – схема присоединения с теплообменником; 1 – тепловые сети (или котельная); 2 – система отопления; 3 – узел смешения; 4 – теплообменник; 5 – ввод в здание от наружной тепловой сети; 6 – вывод к наружной тепловой сети; 7, 8 – присоединение отводов прямого и обратного теплоносителя системы отопления здания; 9 – отвод с задвижкой и заглушкой для горячего теплоносителя; 10 – то же для обратного теплоносителя

Fig. 2. The most simple scheme of fast (emergency) connection of an external source of heat: а – direct connection scheme; б – scheme of connection with the blending unit; с – scheme of connection with heat exchanger; 1 – heat networks (or boiler); 2 – heating system; 3 – blending unit; 4 – heat exchanger; 5 – inlet to the building from external heat network; 6 – output to the outer heating networks; 7, 8 – connection of the taps of the direct and reverse heat carrier of the heating system of the building; 9 – offtake with gate valve and plug for the hot heat carrier; 10 – same for the reverse heat carrier

В качестве наружного источника теплоты можно использовать испытанную в г. Минске передвижную котельную мощностью 1 МВт, смонти-

рованную на базе полуприцепа автомобиля МАЗ. Эта котельная также оборудована насосами, которые могут использоваться в качестве рециркуляционных для прокачки капельной жидкости (воды) через систему отопления здания.

При независимой схеме присоединения системы водяного отопления к тепловым сетям использование наружного источника теплоты может производиться по двум основным вариантам: с использованием циркуляционного насоса системы отопления здания, что уменьшает общие энергозатраты наружного источника теплоты, и без использования циркуляционного насоса системы отопления здания.

Как видно из приведенных схем присоединения наружного источника теплоты, все они предусматривают прямое быстрое присоединение (передвижного наружного источника теплоты или газа) к системе отопления здания в аварийных ситуациях и отключение наружной отопительной сети, что существенно уменьшает расход энергии на циркуляцию теплоносителя.

В случае использования сжиженного газа его предварительно переводят в газообразное состояние и смешивают с воздухом в безопасной концентрации на основе рекомендаций А. А. Ионина [17, с. 266–267]. В качестве аварийного резервного газа предлагается использовать газозвоздушные смеси, получаемые при помощи установок получения газозвоздушной смеси (УГВС) из паров сжиженных углеводородных газов (СУГ) и воздуха. УГВС можно смонтировать на полуприцепе и совместно с полуприцепом для СУГ объемом 39 м³ (ГОСТ 27352 и др.) использовать для аварийного газоснабжения крышной котельной или квартирных отопителей без каких-либо переделок горелок.

Как справедливо считает В. М. Пилипенко [18, с. 3], народнохозяйственная значимость проблемы реконструкции и модернизации жилых домов индустриальной жилой застройки 60–80-х гг. прошлого века возрастает с увеличением срока эксплуатации зданий. Это же в полной мере относится к 2–3-этажным зданиям, построенным в конце 40-х и 50-х годов прошлого столетия, примером чему является жилой район, расположенный напротив главного входа в Минский тракторный завод.

Большинство исследователей пришло к выводу, что реконструкция и придание эксплуатируемому с указанными выше сроками постройки жилому фонду современных потребительских качеств – наиболее рациональное и эффективное использование ресурсов государства при решении жилищной проблемы [18, с. 3, 4]. При этом необходимо учитывать, что, по оценкам специалистов, затраты на снос жилых домов могут достигать 60 % стоимости строительства нового жилья такой же площади [18, с. 47].

Известно много способов уменьшения удельного расхода теплоты на отопление путем повышения термического сопротивления ограждающих конструкций за счет их дополнительного наружного покрытия теплоизолирующими материалами [19]. При этом, как правило, не учитывается эффект влияния размеров и конфигурации здания на удельные расходы теплоты на отопление: объемные (Вт/м³) и площадные (Вт/м²).

Известен способ восстановления жилых зданий, сооруженных методом крупнопанельного строительства [19], заключающийся в дополнительной установке перед старым зданием самонесущего каркаса, который соединяют с имеющейся структурой здания. В несущий каркас вставляют сборные комнатные секции или элементы стен, пола и потолка. Полученные новые помещения объединяют со старым зданием путем общей перепланировки.

Еще один способ реконструкции зданий [20] заключается в надстройке вышележащих этажей и одновременном уширении здания с возведением ограждающей теплой керамзитожелезобетонной стены и дополнительных перекрытий в уровнях существующего здания с частичной перепланировкой его помещений. Преимуществом этого способа является увеличение общего объема вторичного здания с улучшением его формы с точки зрения влияния на удельный расход теплоты на отопление. Недостатками являются большая удельная площадь ограждающих конструкций, возводимых со всех сторон здания по его контуру.

В приведенных способах не упоминается о возможности уменьшения удельных затрат теплоты на отопление при увеличении объема здания и изменении его формы в результате реконструкции, так как основной целью реконструкции старых зданий, особенно в ставших центральными районах городов, является увеличение жилой площади и комфортности при соблюдении нормативов теплозащиты и удельных расходов теплоты.

Поэтому целесообразно сформулировать следующие задачи для процесса реконструкции, в частности, жилых зданий:

- уменьшение удельных расходов теплоты на отопление имеющихся в микрорайоне зданий за счет не только дополнительной наружной тепловой изоляции ограждающих конструкций, но и эффекта от увеличения объема и изменения формы зданий при реконструкции;
- снижение удельной площади наружных ограждающих конструкций, возводимых при модернизации и реконструкции зданий;
- экономия площади земли в микрорайоне под реконструируемыми и новыми зданиями при существенном увеличении плотности застройки (1 м^2 жилья на 1 га).

Для решения указанных задач предлагается при реконструкции старых зданий увеличение их объема производить путем объединения двух и более зданий в одно – вторичное здание – с соответствующим проекту заполнением новыми помещениями промежутков между старыми зданиями, со значительным увеличением этажности и с уширением реконструированного здания. В итоге резко увеличиваются этажность (в 2–3 раза) и ширина здания (на 20–30 %), что приводит к существенному снижению удельных тепловых затрат во вторичном здании по сравнению с результатом реконструкции таких старых домов без их объединения даже при одинаковом термическом сопротивлении ограждающих конструкций. Одновременно экономится территория, занимаемая одним реконструированным домом,

включившим оба старых малоэтажных здания, по сравнению с отдельной реконструкцией каждого из старых зданий, когда необходимо выдерживать противопожарные и строительные разрывы между зданиями. Снижение удельной площади наружных ограждающих конструкций при объединении достигается тем, что отпадает необходимость в их возведении вдоль по меньшей мере двух взаимно прилегающих смежных стен объединяемых домов. Способ поясняется схемами, приведенными на рис. 3, 4.

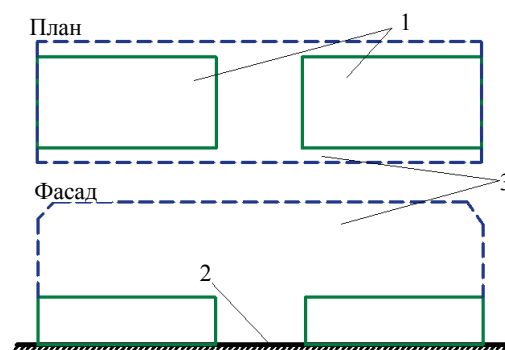


Рис. 3. Схема объединения двух соседних малоэтажных зданий:

1 – реконструируемые (объединяемые) здания; 2 – расстояние (промежуток) между зданиями; 3 – реконструированное (вторичное) здание

Fig. 3. The scheme of merging of two neighboring low-rise buildings:

1 – buildings being reconstructed (merged); 2 – distance (interval) between buildings; 3 – building having been reconstructed (i. e. the secondary one)

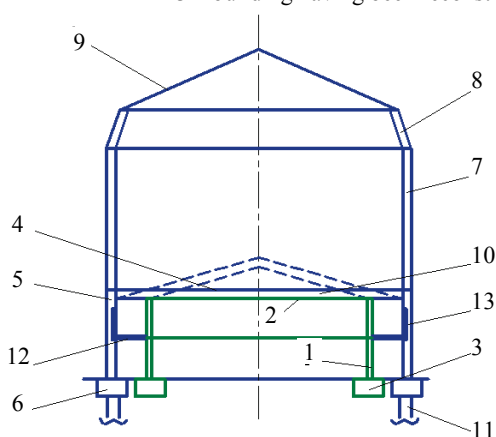


Рис. 4. Схема надстройки вторичного здания, объединяющего старые здания:

1 – стена старого здания; 2 – перекрытие верхнего (2-го) этажа старого здания; 3 – фундамент старого дома; 4 – новое перекрытие; 5 – несущие конструкции надстройки; 6 – фундамент надстройки; 7 – стена надстройки; 8 – стена мансарды; 9 – крыша надстройки; 10 – конструктивный зазор; 11 – буронабивные сваи; 12 – плиты пола-потолка лоджий; 13 – монолитные ограждения

Fig. 4. The scheme of the superstructure of the secondary building that combines old buildings:

1 – wall of the old building; 2 – overlap of the upper (2nd) floor of the old building; 3 – foundation of the old house; 4 – new overlap; 5 – bearing structures of the superstructure; 6 – foundation of the superstructure; 7 – wall of the superstructure; 8 – wall of the attic; 9 – roof of the superstructure; 10 – structural gap; 11 – bored piles; 12 – slabs of floor-ceiling of loggias; 13 – monolithic fences

Форма реконструируемого здания создается с таким расчетом, чтобы его размеры при совмещении, особенно уширении, принимали максимально возможные значения с учетом расположения соседних зданий, проч-

ностных характеристик, строительных материалов и норм архитектурной эстетики.

Как известно из курса теплофизики, стационарная теплоотдача поверхности плиты описывается простым уравнением

$$q = \frac{\Delta t S_i}{R}, \quad (7)$$

где q – тепловой поток (теплоотдача), Вт; Δt – перепад температур для рассматриваемого случая между температурами наружного (t_n) и внутреннего (t_b) воздуха в помещении, $\Delta t = t_b - t_n$, °С; S_i – площадь теплоотдающей поверхности (ограждения), м²; R – термическое сопротивление, учитывающее теплопроводность ограждения и особенности теплоотдачи, м²·град/Вт.

В строительных нормах и при теплотехнических расчетах в качестве показателя эффективности тепловой изоляции зданий и сооружений часто используются величины удельных расходов теплоты (объемного (Вт/м³) и площадного (Вт/м²)), а также нормативные величины термических сопротивлений R ограждающих конструкций. Если принять, что все трансмиссионные потери теплоты через ограждающие конструкции составляют $Q = \sum q$, то удельные объемные потери теплоты в случае $\Delta t = \text{const}$ для всех помещений

$$\frac{Q}{V} = \frac{\sum q_i}{V} = \frac{\Delta t \sum S_i}{R_i}, \quad (8)$$

где V – внутренний отапливаемый объем здания, м³; q_i – тепловой поток (теплоотдача) отдельных элементов ограждающих конструкций, Вт; R_i – термическое сопротивление, учитывающее теплопроводность отдельных элементов ограждения и особенности их теплоотдачи, м²·град/Вт.

Если для простоты принять форму здания в виде прямоугольного параллелепипеда, то можно получить выражение

$$\frac{Q}{V} = \Delta t \left[\frac{2 \cdot \left(\frac{1}{y} + \frac{1}{x} \right)}{R_{\text{ст}}} + \frac{\left(\frac{1}{R_{\text{пк}}} + \frac{1}{R_{\text{пол}}} \right)}{z} \right], \quad (9)$$

где x, y, z – длина, ширина, высота здания, м; $R_{\text{ст}}, R_{\text{пк}}, R_{\text{пол}}$ – средние (приведенные) термические сопротивления соответственно стен (с учетом окон), потолка (с учетом чердачных помещений и крыши) и пола (с учетом подвальных помещений).

Как видно из (9), с ростом термического сопротивления и габаритов отапливаемого здания удельный расход теплоты на отопление уменьшается.

Так, для снижения трансмиссионных потерь теплоты в два раза необходимо повысить термические сопротивления ограждений в два раза или их эквивалентное сочетание. В первом приближении при увеличении всех линейных размеров здания в два раза его объем повышается в восемь раз, а трансмиссионные потери возрастают в четыре раза, т. е. уменьшают удельные потери в два раза. Однако одни габаритные размеры можно увеличивать более чем в два раза (этажность и длина здания), а другие размеры – гораздо меньше или оставлять неизменными (ширина здания). В итоге удельные потери теплоты также существенно снижаются.

Для уменьшения удельного расхода теплоты на отопление существенное значение имеет форма здания. Минимальное значение удельного расхода теплоты при одинаковом объеме присуще шарообразной форме (наилучшая форма здания). При переходе от шаровой к цилиндрической и далее к кубической форме (ухудшение формы) удельный расход теплоты увеличивается. Для цилиндрической формы наименьшее отношение площади поверхности к объему реализуется при равенстве высоты цилиндра его диаметру [21, с. 371]. Такую форму цилиндра для простоты удобно называть равноцилиндрической. Для параллелепипеда любой формы удельный расход теплоты больше, чем куба. С приближением от параллелепипеда к кубической форме удельный расход теплоты при прочих равных условиях уменьшается.

Приведенные выше рекомендации по реконструкции жилых зданий, приводящие к экономии энергопотребления, были запатентованы [22].

ВЫВОДЫ

1. Предложен способ предотвращения конденсации влаги на ограждениях смежных помещений с разной температурой воздуха, содержащих системы отопления и использования вторичной теплоты удаляемого из помещения отработанного воздуха.

2. Для обеспечения быстрого аварийного подключения внутридомовых систем теплогазоснабжения к наружным передвижным источникам теплоты и газа рекомендуется дополнительно устанавливать специальные отводы с соединительными устройствами в специальных теплоизолированных нишах в стенах или других частях зданий с учетом возможности размещения вблизи наружных передвижных источников теплоты и газа.

3. В случае отопления здания крышной газовой котельной или поквартирными отопителями, питаемыми газом, по стене дома прокладывают единый газопровод (коллектор), оборудованный дополнительным устройством для подключения аварийного газоснабжения.

4. Для уменьшения удельного расхода теплоты на отопление зданий рекомендуется при модернизации и реконструкции увеличивать полезный объем зданий и улучшать их формы различными способами, в том числе путем объединения двух или более соседних малоэтажных зданий в одно

вторичное здание с повышением этажности, с уширением с любой или с каждой стороны.

5. Размеры реконструируемого здания принимают максимально возможными, а их пропорции, при любом количестве объединяемых зданий, – обеспечивающими стремление формы к шаровой, или равноцилиндрической, или кубической при любом их сочетании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилипенко, В. М. Современные потребительские качества жилья / В. М. Пилипенко // Современные методы индустриального домостроения: энергоэффективные системы и конструктивно-технологические решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.», 2011. С. 5–11.
2. Чистякова, С. Б. Здоровье населения России – стратегия развития среды жизнедеятельности: сб. статей к общему собранию РААСН / С. Б. Чистякова. М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2008. Т. 1. С. 240–245.
3. Квач, П. И. Оценка системы менеджмента качества в проектных и подрядных организациях / П. И. Квач, Г. В. Земляков // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства: сб. Междунар. науч.-техн. статей (материалы науч.-метод. конф.), 27–28 мая 2014 г. Минск: БНТУ, 2015. С. 203–212.
4. Вашенко, Д. А. Опыт энергообследования построенных зданий и рекомендации по улучшению состояния / Д. А. Вашенко // Современные методы индустриального домостроения: энергоэффективные системы и конструктивно-технологические решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.», 2011. С. 55–56.
5. Протасевич, А. М. Особенности тепловлажностного режима ограждающих конструкций с эффективным использованием энергии / А. М. Протасевич, В. В. Лешевич // Современные методы индустриального домостроения: энергоэффективные системы и конструктивно-технологические решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.», 2011. С. 67–71.
6. Кацынель, Р. Б. Анализ эффективности жилых зданий, их конструктивных узлов во взаимосвязи с температурно-влажностным режимом квартир / Р. Б. Кацынель, А. М. Протасевич, В. В. Лешевич // Современные методы индустриального домостроения: энергоэффективные системы и конструктивно-технологические решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.», 2011. С. 56–59.
7. Справочник проектировщика. Вентиляция и кондиционирование воздуха / под ред. И. Г. Старовойтова. М.: Стройиздат, 1978. 510 с.
8. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.02-108–2008 (02250). Введ. 01.12.2008. Минск: Минстройархитектуры, 2008. 89 с.
9. Теплоснабжение и вентиляция: курсовое и дипломное проектирование / под ред. Б. М. Хрусталева. М.: Изд-во АСВ, 2007. 784 с.
10. Богуславский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богуславский. М.: Высш. шк., 1982. 416 с.
11. Способ предотвращения конденсации влаги на ограждениях смежных помещений с разной температурой воздуха: евразийский пат. № 024278 / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко. Оpubл. 30.10.2014.
12. Способ реконструкции систем теплогазоснабжения здания, сооружения: евразийский пат. № 016799 / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко. Оpubл. 29.04.2011.
13. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СНБ 4.02.01–03 (с изм. № 1–7). Введ. 01.01.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 81 с.

14. Газораспределение и газопотребление. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.03-267–2012 (с изм. № 1). Введ. 01.12.2012. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 102 с.
15. Передвижной теплогенератор: пат. РФ № 2178119 / Р. В. Алтухов, Н. В. Дашунин, В. А. Иванов [и др.]. Оpubл. 10.01.2002.
16. Способ восстановления или реконструкции системы газоснабжения внутри зданий и сооружений: евразийский пат. 008296 / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко, А. С. Атаев. Оpubл. 27.04.2007.
17. Ионин, А. А. Газоснабжение / А. А. Ионин. М.: Стройиздат, 1989. 439 с.
18. Пилипенко, В. М. Комплексная реконструкция индустриальной жилой застройки: организационно-технологические основы / В. М. Пилипенко. Минск: Адукацыя і выхаванне, 2007. 279 с.
19. Verfahren zum Sanieren von Wohngebäuden, die in Plattenbauweise Hergestellt Sind: Patent DE 19639471 / Bjoern Bechmann. Veröffentlicht 13.09.2001.
20. Способ реконструкции зданий: пат. РФ № 2036291 / Р. Р. Гаспарян, В. Н. Мириманов. Оpubл. 27.05.1995.
21. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. М.: Гостехиздат, 1957. 783 с.
22. Способ уменьшения удельного расхода тепла на отопление зданий при модернизации и реконструкции: евразийский пат. № 009747 / В. М. Пилипенко, С. Н. Осипов, А. А. Кулак. Оpubл. 28.02.2008.

Поступила 28.04.2017 Подписана в печать 05.07.2017 Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Pilipenko V. M. (2011) The Modern Consumer Quality of Housing. *Sovremennye Metody Industrial'nogo Domostroeniya: Energoeffektivnye Sistemy i Konstruktivno-Tekhnologicheskie Resheniya: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Modern Methods of Industrial Housing Construction: Energy Efficient Systems and Technological Solutions: Proceedings of the International, Scientific-and-Technical Conference]. Minsk: UE "Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.", 5–11 (in Russian).
2. Chistyakova S. B. (2008) *Health of the Population of Russia: the Development of the Environment Strategy: Collected Articles to the General Meeting of the RAACS. Vol. 1.* Moscow, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 240–245 (in Russian)
3. Kvach P. I., Zemlyakov G. V. (2015) Assessment of the Quality Management System of Design and Contracting Organizations. *Sovremennye Problemy Vnedreniya Evropeiskikh Standartov v Oblasti Stroitel'stva, Sbornik Mezhdunarodnykh Nauchno-Tekhnicheskikh Statei, (Materialy Nauchno-Metodicheskoi Konferentsii), 27–28 maya 2014 g.* [Modern Problems of Implementing European Standards in the Field of Construction. Collected Papers]. Minsk, BNTU, 203–212 (in Russian).
4. Vashchenko D. A. (2011) Experience of Energy Survey of the Buildings and Recommendations for Improvement. *Sovremennye Metody Industrial'nogo Domostroeniya: Energoeffektivnye Sistemy i Konstruktivno-Tekhnologicheskie Resheniya: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Modern Methods of Industrial Housing Construction: Energy Efficient Systems and Technological Solutions: Proceedings of the International. Scientific-and-Technical Conference]. Minsk: UE "Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.", 55–56 (in Russian).
5. Protasevich A. M., Leshevich V. V. (2011) Specific Features of Heat and Humidity Regime of Walling with Efficient Use of Energy. *Sovremennye Metody Industrial'nogo Domostroeniya: Energoeffektivnye Sistemy i Konstruktivno-Tekhnologicheskie Resheniya: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Modern Methods of Industrial Housing Construction: Energy Efficient Systems and Technological Solutions: Proceedings of the International. Scientific-

- and-Technical Conference]. Minsk: UE "Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.", 67–71 (in Russian).
6. Katsynel' R. B., Protasevich A. M., Leshevich V. V. (2011) Analysis of the Efficiency of Residential Buildings and of Their Structural subassemblies in Correlation with the Temperature and Humidity Conditions of the Apartments. *Sovremennyye Metody Industrial'nogo Domostroeniya: Energoeffektivnye Sistemy i Konstruktivno-Tekhnologicheskie Resheniya: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Modern Methods of Industrial Housing Construction: Energy Efficient Systems and Technological Solutions: Proceedings of the International. Scientific-and-Technical Conference]. Minsk: UE "Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.", 56–59 (in Russian).
 7. Staroverov I. G. (ed.) (1978) *Directory of a Designer. Ventilation and Air Conditioning*. Moscow, Stroizdat Publ. 510 (in Russian).
 8. TKP 45-3.02-108–2008 (02250). High-Rise Buildings. Construction Design Standards. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2008. 89 (in Russian).
 9. Khrustalev B. M., Kuvshinov Yu. Ya., Kopko V. M., Mikhalevich A. A., Dyachek P. I., Pokotilov V. V., Sen'kevich E. V., Borukhova L. V., Pilyushenko V. P., Bazylenko G. I., Yurkov O. I., Artikhovich V. V., Pshonik M. G. (2007) *Heating and Ventilation. Term and Diploma Designing*. Moscow, ACB Publ. 784 (in Russian).
 10. Boguslavskii V. N. (1982) *Heat Engineering*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 416 (in Russian).
 11. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2014) *Method of Preventing Condensation of Moisture on the Fences of Adjacent Rooms with Different Temperature*. Eurasia Patent No 024278 (in Russian).
 12. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2011) *Method of Reconstruction of Systems of Heat and Gas Supply of the Building or Construction*. Eurasia Patent No 016799 (in Russian).
 13. Building Codes of Belarus 4.02.01–03 (with Alterations 1–7). *Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2015. 81 (in Russian).
 14. TKP 45-4.03-267–2012 (with Alteration No 1). *Gas Distribution and Gas Consumption. Construction Design Standards*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2008. 102 (in Russian).
 15. Altukhov R. V., Dashunin N. V., Ivanov V. A., Krivopuskov D. A., Rachuk V. S., Savin S. A., Sorokin I. N., Sukhov A. I., Trubnikov A. V., Shevtsov A. P. (2002) *Mobile Heat Generator*. Patent Russian Federation No 2178119 (in Russian).
 16. Osipov S. N., Pilipenko V. M., Ataiev A. S. (2007) *Method of Rehabilitation or Reconstruction of Gas Supply Systems inside Buildings*. Eurasia Patent No 008296 (in Russian).
 17. Ionin A. A. (1989) *Gas Supply*. Moscow, Stroizdat Publ. 439 (in Russian).
 18. Pilipenko V. M. (2007) *The Comprehensive Renovation of Industrial Residential Layout*. Minsk, Adukatsyya i Vykhanne Publ. 279 (in Russian).
 19. Bjoern Bechmann (2001) *Verfahren zum Sanieren von Wohngebäuden, die in Plattenbauweise Hergestellt Sind*. Patent DE 19639471 (in German).
 20. Gasparyan R. R., Mirimanov V. N. (1995) *Method of Reconstruction of Buildings*. Patent Russian Federation No 2036291 (in Russian).
 21. Vygodskii M. Ya. (1957) *Reference Book on Higher Mathematics*. Moscow, Gostekhizdat Publ. 783 (in Russian).
 22. Pilipenko V. M., Osipov S. N., Kulak A. A. (2008) *The Method of Reduction of Specific Heat Consumption for Heating of Buildings Subjected to Modernization and Reconstruction*. Eurasia Patent No 009747 (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-159-166

УДК 697.7

Исследование возможности применения вихревого теплогенератора в системах теплоснабжения жилых, промышленных и общественных зданий

И. Л. Иокова¹⁾, Е. Н. Тарасевич¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В ряде зарубежных стран вихревые теплогенераторы получили широкое распространение в системах децентрализованного теплоснабжения. Для Беларуси вихревые теплогенераторы – это пока достаточно новые источники теплоснабжения. В статье рассматривается возможность применения вихревых теплогенераторов для систем теплоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий. Вихревые теплогенераторы основаны на принципе кавитации в турбулентном потоке воды. Для многих устройств кавитация не желательна, но в вихревом теплогенераторе она используется как положительное явление. Авторами выполнены серии натурных экспериментов для определения эффективности работы вихревого теплогенератора марки ВТГ-2,2 на разных режимах работы. Эффективность работы вихревого теплогенератора можно оценить коэффициентом преобразования энергии. Коэффициент преобразования энергии – это отношение количества тепловой энергии, которую производит вихревой теплогенератор, к количеству потребляемой электрической энергии. Опыты, проводимые в ряде научно-исследовательских организаций (в том числе в НАН Украины, МЭИ), показали, что коэффициент преобразования энергии может превышать единицу. Авторы выполняли испытания на экспериментальной установке, имитирующей систему теплоснабжения. По полученным экспериментальным данным были рассчитаны коэффициенты преобразования энергии для каждого режима. Построенные графические зависимости наглядно показывают, как с увеличением частоты вращения вихревого теплогенератора повышается эффективность его использования. Наибольшее значение коэффициента преобразования энергии составило 61,1 % при частоте вращения 40 Гц. Также выявлено, что с увеличением частоты вращения вихревого теплогенератора происходит значительное увеличение шума и вибраций.

Ключевые слова: источник теплоснабжения, система теплоснабжения, вихревой теплогенератор, коэффициент преобразования энергии

Для цитирования: Иокова, И. Л. Исследование возможности применения вихревого теплогенератора в системах теплоснабжения жилых, промышленных и общественных зданий / И. Л. Иокова, Е. Н. Тарасевич // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 159–166. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-159-166

Адрес для переписки

Иокова Ирина Леонидовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
iokova@bntu.by

Address for correspondence

Iokova Irina L.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
iokova@bntu.by

Investigation of the Possibility of Using a Vortex Heat Generator in Heat Supply Systems for Residential, Industrial and Public Buildings

I. L. Iokova¹⁾, E. N. Tarasevich¹⁾

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

Abstract. In a number of foreign countries, vortex heat generators have become widespread in decentralized heat supply systems. For Belarus, vortex heat generators are quite new sources of heat supply. The article considers the possibility of using vortex heat generators for heat supply systems for residential, public and industrial buildings. Vortex heat generators are based on the principle of cavitation in a turbulent water flow. For many devices cavitation is not desirable, but in a vortex heat generator it is used as a favorable phenomenon. The authors carried out a series of full-scale experiments to determine the efficiency of the “VTG-2.2” vortex heat generator when different operating modes were applied. The performance of the vortex heat generator can be estimated by the energy conversion factor. Energy conversion factor is the ratio of the amount of thermal energy that a vortex heat generator generates to the amount of electrical energy consumed. Experiments conducted in a number of research organizations (including the National Academy of Sciences of Ukraine and MPEI) have demonstrated that energy conversion factor can exceed 1. The authors conducted experimental tests with the use of an experimental installation simulating a heat supply system. According to the obtained experimental data, the energy conversion coefficients for each mode were calculated. The constructed graphical dependencies clearly demonstrate that, with increasing rotational speed of the vortex heat generator, the efficiency of its use increases. The highest energy conversion factor value was 61.1 % with a rotation frequency of 40 Hz. It was also found that with increasing the rotational speed of the vortex heat generator, a significant increase in noise and vibration occurs.

Keywords: heat supply source, building structure, vortex heat generator, energy conversion factor

For citation: Iokova I. L., Tarasevich E. N. (2018) Investigation of the Possibility of Using a Vortex Heat Generator in Heat Supply Systems for Residential, Industrial and Public Buildings. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 159–166. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-159-166 (in Russian)

Одними из основных крупных потребителей топливно-энергетических ресурсов в нашей стране являются системы теплоснабжения, назначение которых – обеспечение теплотехнологий, систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения теплотой требуемого качества. В энергетическом балансе Республики Беларусь расход топлива на нужды теплоснабжения составляет 40–45 %, что подчеркивает важность повышения надежности и энергоэкологической эффективности систем теплоснабжения.

В конкретных условиях предпочтение необходимо отдавать наиболее экономически выгодным техническим решениям. Очевидно, что перспективными направлениями повышения эффективности систем теплоснабжения являются: увеличение степени использования температурного потенциала теплоносителя, производство теплоты в соответствии с теплопотреблением, применение ресурсосберегающего оборудования, типизация оборудования и повышение степени его заводской готовности, повышение качества управления. Отсюда усматривается актуальность всех научно-технических разработок, и роль инновации сложно недооценить [1].

Один из путей решения проблемы рационального энергопотребления – создание децентрализованных систем тепло- и энергоснабжения.

Использование децентрализации в теплоснабжении позволяет лучше адаптировать систему теплоснабжения к условиям потребления теплоты конкретного, обслуживаемого ею объекта, а отсутствие внешних распределительных сетей практически исключает непроизводительные потери теплоты при транспорте теплоносителя. При децентрализации возможно достичь не только снижения капитальных вложений за счет отсутствия тепловых сетей. Организация автономного теплоснабжения позволяет осуществить реконструкцию объектов в городских районах старой и плотной застройки при отсутствии свободных мощностей в централизованных системах [2].

Автономное (децентрализованное) теплоснабжение не заменяет централизованного теплоснабжения от ТЭЦ и тепловых сетей, но является дополнением к созданию комфортных условий для населения. Оно занимает свою нишу, имеет своего заказчика и потребителя и при соответствующих условиях конкурентоспособно централизованному [3]. В этой области разработан и применяется достаточно широкий перечень современного надежного оборудования, с высокой степенью автоматизации и экологическими параметрами, позволяющего обеспечить защиту окружающей среды от вредных выбросов [4].

На рынке присутствует оборудование на базе газовых, электрических котлов, котлов и печей на твердом топливе. Но есть и другие технические решения, на которые стоит обратить внимание. Одними из них являются вихревые теплогенераторы (тепловые гидродинамические насосы), в основе действия которых лежит принцип кавитации в турбулентном потоке воды. Для Беларуси это достаточно новые источники теплоснабжения, которые широко распространены в России, на Украине, в Казахстане, Узбекистане, Южной Корее, Китае, США и Канаде.

Стоит рассмотреть возможность применения вихревых теплогенераторов для систем теплоснабжения жилых, промышленных, общественных и административных зданий, поскольку, исходя из мирового опыта, они обладают рядом положительных качеств, таких как простота конструкции, надежность, безопасность и возможность работы с различными теплоносителями (вода, тосол и т. д.) без их предварительной специальной подготовки. В ряде случаев подобные источники могут заменить традиционные источники теплоснабжения.

При изучении работы вихревых теплогенераторов (тепловых насосов) многие исследователи приходили к выводу, что, расходуя 1 кВт·ч электрической энергии, можно получить более 1 кВт·ч теплоты. В таких ситуациях авторы часто утверждали, что КПД близок, а иногда и больше единицы [5, 6]. Однако первое представление о КПД обманчиво, поскольку преобразование связано со структурным изменением H_2O (молекулы воды), а коэффициент преобразования энергии (КПЭ) – вовсе не коэффициент полезного действия источника. Так появляется понятие $\eta_{КПЭ}$ – коэффициент преобразования энергии высшей формы движения материи в низшую (наименее дефицитную) – теплоту (рождается энтропийная составляющая теплоотвода источника). КПЭ теплогенератора – это соотношение количества тепловой энергии, которую он производит, к количеству потребляемой электрической энергии [7].

Опыты, проводимые в ряде научно-исследовательских организаций, в том числе в НАН Украины и МЭИ, показали, что КПЭ может превышать единицу [8]. Таким образом, в дальнейшем, говоря об эффективности вихревого теплогенератора, будет подразумеваться КПЭ.

В статье рассматривается исследование эффективности работы вихревого теплогенератора в системе теплоснабжения. Для проведения опытов использовалась экспериментальная установка (рис. 1), схема которой представлена на рис. 2.



Рис. 1. Экспериментальная установка

Fig. 1. Experimental installation

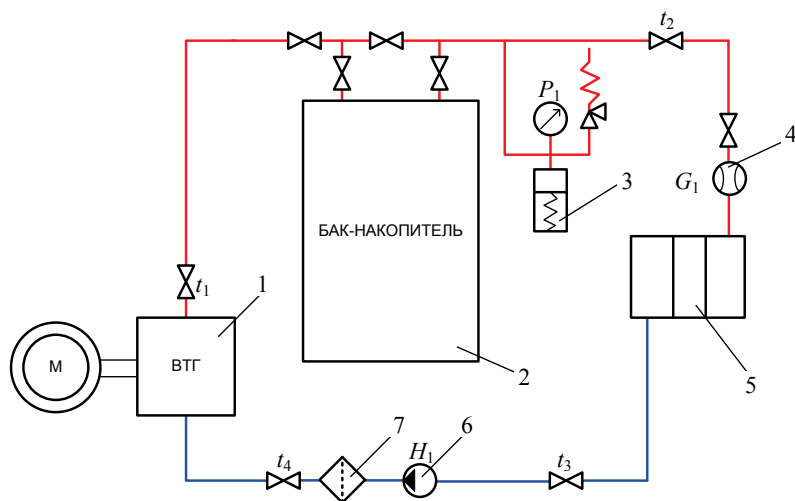


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – вихревой теплогенератор; 2 – бак-накопитель; 3 – расширительный бак; 4 – расходомер; 5 – отопительный прибор; 6 – насос; 7 – фильтр

Fig. 2. Schematic representation of the experimental installation: 1 – vortex heat generator; 2 – storage tank; 3 – expansion tank; 4 – flow meter; 5 – heating device; 6 – pump; 7 – filter

Экспериментальная установка, кроме представленных на рис. 2 элементов, включает в себя приборы измерения температуры и давления.

Для создания экспериментальной установки в качестве источника теплоснабжения использовался вихревой тепловой генератор дискового типа марки ВТГ-2,2, изображенный на рис. 3.

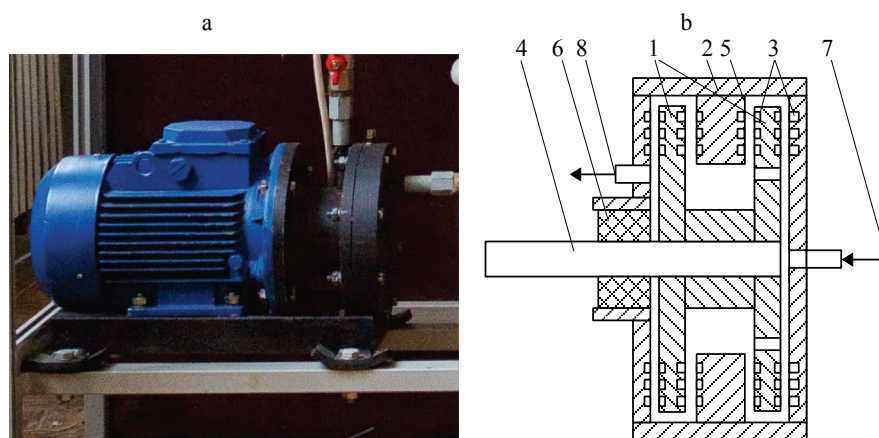


Рис. 3. Общий вид вихревого теплогенератора дискового типа (а) и активатор вихревого теплогенератора (б): 1 – диск ротора; 2 – статор; 3 – углубление; 4 – вал; 5 – вставка; 6 – подшипник; 7, 8 – вход и выход воды

Fig. 3. General view of the vortex heat generator of a disk type (a) and activator of the vortex heat generator (b): 1 – rotor disk; 2 – stator; 3 – spacer; 4 – shaft; 5 – insert; 6 – bearing; 7, 8 – water inlet and outlet

Вихревой теплогенератор дискового типа оснащен электродвигателем и роторным устройством (активатором). Рабочая жидкость под давлением подается на вход роторного устройства. Жидкость внутри полости активатора закручивается (электрическая энергия генератора преобразуется в кинетическую энергию вращения электродвигателя и соединенного с ним дискового активатора), происходит трение жидкости о стенки статора, что приводит к хорошо известному эффекту кавитации. Образующиеся пузырьки пара вращаются с высокой скоростью, сталкиваются друг с другом и препятствиями, что сопровождается выделением импульсов энергии. Кинетическая энергия преобразуется в тепловую, нагревая жидкость. Так происходит двойное преобразование энергии: электрической – в механическую, а механической – в тепловую [9, 10].

Кавитация нежелательна во многих случаях, к примеру кавитация разрушает поверхность гребных винтов, гидротурбин, акустических излучателей, деталей амортизаторов, гидромуфт. Но вихревой тепловой генератор – одно из немногих устройств, где кавитация используется как положительное явление.

Авторами были выполнены серии натурных экспериментов для определения эффективности работы вихревого теплогенератора марки ВТГ-2,2 на разных режимах работы. Опыты проводились на базе кафедры «Промыш-

ленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета.

В экспериментальной установке два отопительных прибора – алюминиевый и чугунный радиаторы (для данной серии экспериментов использовался алюминиевый). Частота вращения вихревого теплогенератора задавалась преобразователем частоты. Эксперименты проводились без использования бака-накопителя. Показания приборов выводились на дисплей, расположенные на стенде управления. Выполнялись измерения температур в следующих точках:

- 1) на выходе из вихревого теплогенератора t_1 ;
- 2) на входе в отопительные приборы t_2 ;
- 3) на выходе из отопительных приборов t_3 ;
- 4) на входе в вихревой тепловой генератор t_4 .

Теплоноситель (вода) в замкнутой системе подается циркуляционным насосом на вход вихревого теплогенератора, где происходит его нагрев. Далее теплоноситель поступает в отопительный прибор, где часть теплоты уходит в окружающую среду, а затем он снова поступает в насос, и цикл повторяется заново.

Каждый эксперимент продолжался в течение одного часа, запись показаний производилась каждые 5 мин. Частота вращения вихревого теплогенератора выбиралась в диапазоне от 10 до 40 Гц с шагом 5 Гц. Эксперименты проводились с 19 марта по 3 апреля 2017 г. Температура в помещении изменялась в пределах (16–19) °С, а на улице (6–10) °С.

Экспериментальные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные

Experimental data

Частота f , Гц	G , кг/ч	t_1 , °С	t_2 , °С	t_3 , °С	t_4 , °С	P , Вт
10	250	21,9	21,8	21,8	21,6	190
15	241	23,7	23,4	23,2	23,2	299
20	235	27,2	26,6	26,6	26,4	403
30	204	36,9	35,8	35,1	34,8	902
35	155	47,9	46,4	44,9	44,2	1123
40	126	58,2	56,2	52,6	51,8	1560

По полученным данным рассчитывался КПЭ

$$\text{КПЭ} = \frac{G c_p \Delta t}{P \cdot 3600},$$

где G – расход теплоносителя, кг/ч; c_p – удельная теплоемкость воды, равная 4,19 кДж/(кг·К); Δt – перепад температур на входе в вихревой теплогенератор и выходе из него, °С; P – мощность электродвигателя, кВт.

Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

Results of calculations

Частота f , Гц	Δt , °C	КПЭ, %
10	0,3	45,9
15	0,5	46,9
20	0,7	47,5
30	2,1	55,2
35	3,7	59,4
40	6,5	61,1

Также были построены графические зависимости перепада температур Δt от частоты вращения вихревого теплогенератора f и коэффициента преобразования энергии от f соответственно (рис. 4, 5).

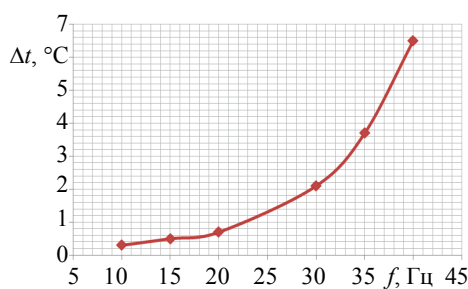


Рис. 4. Зависимость перепада температур от частоты вращения вихревого теплогенератора

Fig. 4. Dependence of the temperature drop on the rotational speed of the vortex heat generator

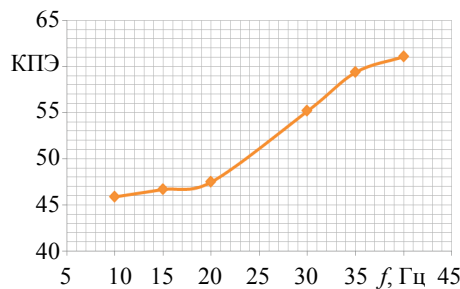


Рис. 5 Зависимость коэффициента преобразования энергии от частоты вращения вихревого теплогенератора

Fig. 5. Dependence of the energy conversion factor on the rotational speed of the vortex heat generator

Наибольший перепад температур и значение КПЭ составили 6,5 °C и 61,1 % соответственно при $f = 40$ Гц.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа экспериментальных данных установлено, что с возрастанием частоты вращения вихревого теплогенератора увеличивается эффективность его использования.

2. Повышение частоты вращения вызывает значительное увеличение шума и вибраций, что необходимо учитывать при проектировании вихревых теплогенераторов в плане требований к звукоизоляции корпуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: Технопринт, 2005. Ч. 2. 410 с.

2. Автономная система теплоснабжения [Электронный ресурс] / «АВОК» – Некоммерческое Партнерство «Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике». Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2317. Дата доступа: 26.09.2017.
3. Полонский, В. М. Автономное теплоснабжение / В. М. Полонский, Г. И. Титов, А. В. Полонский. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2007. 152 с.
4. Автономные и централизованные системы теплоснабжения. Конспект лекций [Электронный ресурс] / Онлайн-библиотека twirpx.com. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/1397502>. Дата доступа: 12.09.2017.
5. Вихревые теплогенераторы [Электронный ресурс] / Вятский государственный университет. Режим доступа: <https://goo.gl/qTjQ4M>. Дата доступа: 18.08.2017.
6. Отопление, горячее водоснабжение [Электронный ресурс] / ООО «Велебит». Режим доступа: <http://www.teplovelebit.ru/>. Дата доступа: 20.09.2017.
7. Иокова, И. Л. Теплоснабжение полевого госпиталя, работающего в условиях экстремальных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук / И. Л. Иокова. Минск: БНТУ, 2015. 210 с.
8. К выбору источника теплоснабжения мобильного строительного сооружения / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 2. С. 67–73.
9. Новые источники энергии на основе вихревых теплогенераторов [Электронный ресурс] / Газета «Энергетика и промышленность России». 2004. № 7. Режим доступа: <http://www.eprussia.ru/epr/47/3155.htm>. Дата доступа: 22.09.2017.
10. Дисковые вихревые теплогенераторы [Электронный ресурс] / Информационно-аналитический портал об энергосбережении и экологии ECOTECO. Режим доступа: <http://www.ecoteco.ru/?id=40>. Дата доступа: 24.09.2017.

Поступила 24.10.2017 Подписана в печать 27.12.2017 Опубликовано онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Khrustalev B. M., Sednin V. A., Akel'ev V. D., Romanyuk V. N., Nerez'ko A. V., Kopko V. M., Nesenchuk A. P. (ed) (2005) *Energy Production and Distribution Systems of Industrial Enterprises. Part. 2*. Minsk, Tekhnoprint. 410 (in Russian).
2. Autonomous Heating System. "AVOK" Non-Commercial Partnership "Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Industrial Thermal Physics Engineers". Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2317 (Accessed 26 September 2017) (in Russian).
3. Polonsky V. M., Titov G. I., Polonsky A. V. (2007) *Autonomous Heat Supply*. Moscow, Association of Construction Higher Educational Establishments. 152 (in Russian).
4. *Autonomous and Centralized Heat Supply Systems*. Available at: <http://www.twirpx.com/file/1397502> (Accessed: 12 September 2017) (in Russian).
5. Vortex Heat Generators. *Vyatka State University*. Available at: <https://goo.gl/qTjQ4M> (Accessed 18 August 2017) (in Russian).
6. Heating, Hot Water Supply. "Velebit" Ltd. Available at: <http://www.teplovelebit.ru/> (Accessed: 20 September 2017) (in Russian).
7. Iokova I. L. (2015) *Heat Supply of the Field Hospital Operating in Extreme Situations*. Minsk, Belarusian National Technical University. 210 (in Russian).
8. Nesenchuk A. P., Beglyak A. V., Ryzhova T. V., Iokova I. L., Beglyak V. V. (2014) Selection of Heat Supply Source for Mobile Construction Structure. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 67–73 (in Russian).
9. New Energy Sources Based on Vortex Heat Generators. *Energetika i Promyshlennost' Rossii* [Power and Industrial Engineering of Russia], 2004, (7). Available at: <http://www.eprussia.ru/epr/47/3155.htm> (Accessed: 22 September 2017) (in Russian).
10. Disk Vortex Heat Generators. *Information-and-Analytical Portal on Energy Saving and Ecology of ECOTECO*. Available at: <http://www.ecoteco.ru/?id=40> (Accessed: 24 September 2017) (in Russian).

Received: 24 October 2017 Accepted: 27 December 2017 Published online: 30 March 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-167-178

УДК [050:001:620.97:005.93]:025.135

Некоторые «экзотические» источники, выявленные в ходе отбора сериальных изданий, в помощь исследованиям по энергобезопасности и энергосбережению, энергоэффективным технологиям и технике: рекомендуемое дополнение к «кругу чтения» специалиста-энергетика

В. С. Лазарев¹⁾, И. В. Юрик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат: Данная работа является фрагментом продолжающегося исследования, направленного на создание комфортной информационной среды, обеспечивающей доступ к публикациям из мировых научных журналов и других периодических и продолжающихся изданий, необходимых для качественного выполнения исследований по приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. В ходе основанного на использовании цитат-анализа с применением данных Journal Citation Reports® отбора мировых научных сериальных изданий, необходимых для качественного выполнения исследований по энергобезопасности и энергосбережению, а также энергоэффективным технологиям и технике (см. его основные результаты в табличной форме. Режим доступа: https://figshare.com/articles/energy_sec_xlsx/5606053/2), помимо искомых изданий был выявлен ряд несериальных информационных источников и достаточно нетипичных для использования в научной деятельности изданий. При индивидуальном рассмотрении каждого такого «экзотического» источника их заметная цитируемость специалистами-энергетиками выглядит вполне логичной. Более того, становится ясным, что эти (по-видимому, ошибочно) отраженные в Journal Citation Reports® материалы являются тем не менее не «информационным шумом», но полезным дополнением к «кругу чтения» специалистов-энергетиков. Поскольку эти источники находятся в открытом доступе в сети Интернет, было решено просто рекомендовать их к включению в «круг чтения» специалистов-энергетиков СНГ, снабдив последних url-адресами и краткими рекомендациями по использованию. Все эти данные приведены в настоящей статье. В отношении видовой принадлежности источников рекомендательный список представлен: базой данных с онлайн-доступом; web-сайтами информационных агентств; web-сайтом Международного энергетического агентства; статистическими ежегодниками и размещающими их электронными ресурсами; ежегодными отчетами правительственных и межправительственных организаций; онлайн-версией газеты (The Guardian).

Ключевые слова: научные журналы, научные сериальные издания, цитат-анализ, цитируемость, цитирование, цитируемые несериальные издания, web-сайты, электронные ресурсы, отбор, оценка, энергетика, интернет-доступ

Адрес для переписки

Лазарев Владимир Станиславович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 16
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 290-46-21
vslazarev@bntu.by

Address for correspondence

Lazarev Vladimir S.
Belarusian National Technical University
16 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 290-46-21
vslazarev@bntu.by

Для цитирования: Лазарев, В. С. Некоторые «экзотические» источники, выявленные в ходе отбора сериальных изданий, в помощь исследованиям по энергобезопасности и энергосбережению, энергоэффективным технологиям и технике: рекомендуемое дополнение к «кругу чтения» специалиста-энергетика / В. С. Лазарев, И. В. Юрик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 167–178. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-167-178

Some “Exotic” Information Sources that Have Been Discovered during the Selection of Serial Publications to Support Research in Energy Security, Energy Conservation and Energy Efficiency Technologies and Techniques: Advantageous Addition for Professional Reading of a Power Engineering Expert

V. S. Lazarev¹⁾, I. V. Yurik¹⁾

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

Abstract: This work is a fragment of ongoing research aimed at creating a comfortable information environment that provides access to the publications of international scientific journals and other periodicals and continuing publications that are necessary to support qualitative performance of research in Priority Directions of the Research and Technical Activities in the Republic of Belarus for 2016–2020. During the citation analysis-based selection of the world scientific serial publications apposite for a qualitative performance of research in energy security, energy conservation and energy efficient technologies and techniques with the use of the data of Journal Citation Reports® (which basic results are available at: https://figshare.com/articles/energy_sec_xlsx/5606053/2) a noticeable amount of non-serial items was also found out in addition to serial publications, as well as some publications that, though being serial, did not look typical to be used in the research activities. Individual consideration of each such “exotic” information source confirmed, however, that their noticeable citedness by the world experts in power engineering looked quite natural. Moreover, it becomes clear that these (apparently wrongly) reflected in Journal Citation Reports® information sources are, however, not an “information noise”, but a useful addition to the “professional reading” of power engineering experts. Since these sources are publicly available via the Internet, it was decided just to recommend them for inclusion in the professional reading of the CIS power engineering experts, providing the latter with URLs and brief recommendations for the use. All the mentioned data is given in the present article. As for the species structure of the information sources included in our reference list, there are: a database with online access; web-sites of news agencies; web-site of the International Energy Agency; statistical yearbooks and the electronic resources exposing them, annual reports of governmental and intergovernmental organizations; the online version of the newspaper (“The Guardian”).

Keywords: scientific journals, scientific serial publications, citations analysis, citedness, citations, cited non-serial publications, web-sites, electronic resources, selection, evaluation, power engineering, internet access

For citation: Lazarev V. S., Yurik I. V. (2018) Some “Exotic” Information Sources that Have Been Discovered during the Selection of Serial Publications to Support Research in Energy Security, Energy Conservation and Energy Efficiency Technologies and Techniques: Advantageous Addition for “Professional Reading” of a Power Engineering Expert. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 167–178. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-167-178 (in Russian)

Введение

Данная работа является фрагментом продолжающегося исследования, направленного на создание комфортной информационной среды¹, обеспечивающей доступ к публикациям из мировых научных журналов и других

¹ Представление авторов об информационной среде лежит в русле концепции, изложенной в статье К. А. Калюжного [1].

периодических и продолжающихся изданий, необходимых для качественного выполнения исследований по приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. [2], некоторые результаты которого опубликованы в [3, 4]. Видовая ориентация документальной составляющей среды обусловлена ведущей ролью журнальных статей в научных коммуникациях по естественнонаучным и техническим дисциплинам и их высокой долей в видовой структуре соответствующего документального потока, а также тем, что отраслевые конференции, обобщающие монографии по важнейшим ее проблемам, руководства по наиболее актуальным проблемам отрасли, выходят зачастую в виде продолжающихся изданий. Методика исследования, выполняемого с привлечением данных, отраженных в Journal Citation Reports® (JCR), подробно раскрыта в [3, 4]; единственное заметное отличие, характерное именно для данной работы по тематике «Энергобезопасность и энергосбережение, энергоэффективные технологии и техника», заключается в том, что «пороговое» значение цитируемости (в силу различий в концентрации документальной информации) было дважды принято равным восьми ссылкам². Основные его результаты в табличной форме доступны в репозитории figshare [7]³.

Как стало уже обычным для наших исследований, в ходе выявления мировых сериальных изданий в помощь исследованиям по энергобезопасности и энергосбережению, энергоэффективным технологиям и технике мы «отсеивали» те цитируемые источники информации, которые оказалось невозможным идентифицировать, а также те издания, которые были признаны нами явно бесполезными для создания планируемой информационной среды. Однако решению об окончательном «отсеиве» каждого трудноидентифицируемого (но идентифицированного в итоге) источника, попавшего в черновой итоговый список цитированных источников (т. е. список, ограниченный только принятым уровнем их цитируемости), предшествовало рассмотрение возможностей его использования в качестве элемента «круга чтения» специалистов. Причем подобный подход касался и цитируемых несериальных изданий, данные о которых в JCR попали, вероятно, по ошибке. Цитируемых трудноидентифицируемых несериальных изданий и источников обнаружилось вполне заметное количество, и было принято решение выделить в отдельную статью описание тех из них, которые также предположительно могли бы найти свое место в «круге чтения» специалистов-энергетиков. В этот «круг» было решено включить – с некоторыми оговорками – и высокоцитируемые газетные издания, которые хотя и являются сериальными, но в принципе крайне редко используются в научной работе. Поскольку одни из рассматриваемых информационных источников редко используются в научной работе, а другие не должны были бы вообще отражаться в JCR, эти цитируемые источники представляется естественным называть далее «экзотическими».

² В качестве журналов – источников библиографических ссылок, – представляющих направление «Энергобезопасность и энергосбережение, энергоэффективные технологии и техника», на основании анализа их тематики в Journal Citation Reports® [5], в базе данных ULRICHSWEB™ [6] и на сайтах самих журналов были избраны: "Energy Efficiency" (SPRINGER, ISSN: 1570-646X), "Energy" (PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, ISSN: 0360-5442) и "Energy Policy" (ELSEVIER SCIENCE LTD, ISSN: 0301-4215). «Окно цитирования» – 2016 г. (более поздние данные в JCR пока недоступны). «Публикационное окно» – 2011–2016 гг.

³ В работе принимал участие А. В. Скалабан, которому авторы выражают искреннюю признательность.

Данная статья адресована прежде всего специалистам-энергетикам СНГ. Поэтому мы опускаем описание ряда методических деталей, особенно в части «расшифровки» неудобоприемлемых сокращенных наименований цитируемых источников, и переходим непосредственно к списку тех из них, которые после тщательного рассмотрения⁴ было решено рекомендовать для включения в «круг чтения» и которые включены в табл. 1. Причины, побудившие нас рекомендовать тот или иной «экзотический» источник (помимо уровня его цитируемости), кратко отражены в колонке 4 табл. 1.

Рекомендуемые «экзотические» источники

В отношении видовой принадлежности источников рекомендуемый список представлен: базой данных (БД) с онлайн-доступом; web-сайтами информационных агентств; web-сайтом международного энергетического агентства; статистическими ежегодниками и размещающими их электронными ресурсами; ежегодными отчетами правительственных и межправительственных организаций; онлайн-версией газеты (“The Guardian”). Все источники свободно доступны в сети Интернет; их список, как указывалось, представлен в табл. 1.

В дополнение к данным, приведенным в табл. 1, отметим, что среди цитируемых источников встретилось и несколько разовых монографий (не входящих в какую-либо серию), а также учебников. Применительно к структуре цитируемости, изучаемой с помощью JCR, такое положение дел – не более чем курьезная ошибка. Однако сейчас нас интересует другое: могут ли данные о таких цитируемых книгах также быть полезны специалистам, обслуживаемым библиотекой?

В единичных известных нам работах, посвященных изучению цитируемости не входящих в серии книг [10, 11, р. 289], нет четко сформулированной прикладной цели применения полученных данных. Что, в общем, совершенно и понятно: данные о состоявшейся цитируемости журнала могут быть полезны, например, для будущей подписки этого журнала. Но что реально можно сделать в будущем (в контексте деятельности библиотек) в отношении обеспечения стабильной доступности читателям книги, которая издана настолько давно, что уже успела получить заметное количество ссылок?!

Полученные в рамках данной работы данные показали, что «в эпоху Интернета» даже отдельные цитируемые книги, не входящие в серии (не являющиеся продолжающимися изданиями), могут быть с пользой рекомендованы специалистам для самостоятельного ознакомления с ними даже без принятия каких-либо посреднических мер со стороны библиотеки (помимо выявления электронных адресов, по которым доступны их полные тексты). Например, поиск в Интернете цитируемого источника, названного в JCR “THERMODYNAMICS ENG A”, привел нас к нахождению книги: Cengel Y. A. и Boles V. A. Thermodynamics: an Engineering Approach, 5th ed. (Boston: McGraw Hill College, 2006. 988 p.), которая названа в Интернете «мировым бестселлером, принесшим дальнейшее уточнение подхода, который подчеркивает физическое понимание фундаментальных понятий термодинамики», учебником, «говорящим непосредственно с инженерами завтрашнего дня в простой, но точной форме, поощряющей творческое мышление»⁵.

⁴ Вынужденным исключением были цитируемые газетные материалы.

⁵ Abebooks.Co.Uk Passion for Books: Thermodynamics: an Engineering Approach, 5th ed. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.abebooks.co.uk/Thermodynamics-Engineering-Approach-5th-Cengel-Yunus/1943380167/bd>. Дата доступа: 13.11.2017.

Таблица 1

Высокоцитируемые в научных журналах, представляющих тематику «Энергобезопасность и энергосбережение, энергоэффективные технологии и техника», «экзотические» источники, рекомендуемые для профессионального чтения специалистами-энергетиками

The “exotic” information sources highly cited in the journals in energy security, energy conservation and energy efficiency technologies and techniques that are advisable for professional reading of power engineering experts

Наименование рекомендуемого источника	Сокращение или варианты сокращений, под которым источник или его фрагменты был(и) процитирован(ы) в JCR / количество ссылок	Адрес url (на момент подачи статьи в печать)	Краткая характеристика и комментарий (при необходимости)
1	2	3	4
NIST Standard Reference Materials	NIST STAND REFERE / 11	https://www.nist.gov/srm	БД с онлайн-доступом Национального института стандартов и технологий США содержит информацию о присутствии тех или иных стандартов, стандартных эталонных материалов и стандартных справочных материалов по конкретным «техническим категориям» (без бесплатного доступа к полным текстам либо эталонам); при этом в открытом доступе – новостные и технические публикации (руководства пользователей, методики оценки, отчеты о сертификации, описания калибровочных процедур, эталонных материалов и т. д.). «Промышленность, научные круги и правительственные органы используют NIST SRMs для совершенствования торговли и для продвижения научных исследований и разработок» ⁶
Reuters	REUTERS / 8	https://www.reuters.com	Сайт информационного агентства деловой и финансовой информации, открытый для всех. Цитировался в публикациях по финансовым аспектам энергетики

⁶ About NIST SRMs [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nist.gov/srm/about-nist-srms>. Дата доступа: 21.11.2017. Из описания ясно, что эта база данных отнюдь не специализирована в области энергетики; это же касается и ряда других рекомендуемых ниже источников. Однако это не должно смущать специалиста-энергетика: из пяти направлений, по которым мы выполнили свои исследования («Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы» [3], «Атомная энергетика» [4], «Оптоэлектроника и оптические системы», «Нанотехнологии» и направление, описываемое в данной статье), только специалисты в области энергобезопасности и энергосбережения, энергоэффективных технологий и техники цитировали приведенные в данной таблице документы.

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Bloomberg	BLOOMBERG / 9	https://www.bloomberg.com/europe	Открытый для всех сайт агентства финансово-экономических новостей, являющийся конкурентом предыдущему, также цитруемый в публикациях по финансовым аспектам энергетики. Заметим, что как показал анализ функционирования БД ULRICHSWEB™ и электронного ресурса EBSCO: Firststep: All Your Favorite Digital Magazines [8], под сокращением BLOOMBERG мог цитироваться как действительно сам сайт этого агентства, так и либо печатный журнал Bloomberg Markets (ISSN: 1531-5061, издатель Bloomberg Finance L.P.), относящийся к категории "trade magazines" (т. е. к периодическим изданиям для работников торговли или промышленности [9]), либо цифровые журналы Bloomberg (Asia Edition), Bloomberg (Europe Edition) и Bloomberg Businessweek. Поэтому адрес https://www.bloomberg.com/europe может быть рекомендован исследователям в области энергобезопасности и энергосбережения, энергосберегающих технологий и техники и как адрес сайта агентства Bloomberg (т. е. как самостоятельный источник финансовой информации), и как ключ к электронным журналам, указанным выше: переход к этим журналам осуществляется с сайта агентства
International Energy Agency	CO2 EM FUEL COMB HIG, CO2 EM FUEL COMB и др. / всего 38	http://www.iea.org/publications/	Сайт Международного энергетического агентства, содержащий ссылки («линки») к следующим процитированным бесплатным онлайн-источникам книжного формата или их фрагментам (а также к ряду других – не процитированных – источников, которые, судя по их тематике, полезны энергетикам): CO2 Emissions from Fuel Combustion Highlights, CO2 Emissions from Fuel Combustion IEA – excerpt, CO2 Highlights 2016 – Excel tables, Projected Costs of Generating Electricity и Key World Energy Statistics. (Мы опускаем упоминания о годах издания в названиях, так как цитироваться могли одни годы, при первичном просмотре сайта могло открываться издание уже более позднего года, а к моменту выхода статьи он вновь может измениться.) Также на данном сайте имеются ссылки и на платную литературу, но он рекомендуется не по этой причине (заметим, что платные источники не нашли отображения в структуре цитируемости)

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
China Statistical Yearbooks Data-base	CHIN EN STAT YB, CESY CHIN EN STAT YB / всего 12	http://tongji.cnki.net/overseas/engnavi/HomePage.aspx?id=N2012020066&name=YCXME&floor=1	БД со свободным онлайн-доступом, включающая ежегодный статистический справочник CHINA ENERGY STATISTICAL YEARBOOK с 1986 по 2014 г. (с пробелами), содержащий «весьма полные данные по созданию, производству, потреблению энергии, балансу между ее поставками и потребностями в ней» ⁷ .
Statistical Data-base “National Bureau of Statistics of China” Data	CHIN STAT YB / 10	http://www.stats.gov.cn/english/statisticaldata/AnnualData	БД со свободным онлайн-доступом National Bureau of Statistics of China. Data ⁸ содержит аналогичную статистику с 2002 г. и за 1996 и 1998–2001 гг., выделенную не в отдельную «книгу», а в раздел Energy (в более общем по структуре статистическом ежегоднике China Statistical Yearbook), содержащий сведения «о производстве энергии, ее потреблении... об эластичном соотношении производства и потребления энергии; общем балансе энергии и о балансах различных видов энергии; потреблении энергии по секторам экономики и по видам энергии; об эффективности использования энергии, переработки и преобразования, а также потребления энергии для непроизводственных целей» ⁹ . Источник был найден по ссылкам на CHIN STAT YB, последний выпуск которого имеет отдельный url-адрес (см. сноску 7)
Energy economics BP Statistical Review of World Energy	BP STAT REV WORLD EN, STAT REV WORLD EN, STAT REV WORLD EN 20, BP EN OUTL 2035 / всего 46	https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html	Через раздел сайта British Petroleum – вход на статистический ежегодник BP Statistical Review of World Energy ¹⁰ (есть бумажная версия; под таким названием он зарегистрирован в БД ULRICHSWEB™ – уточнение, связанное с вариативностью названия источника). Там же – ссылка на «энергетический

⁷ China Statistical Yearbooks Database [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tongji.cnki.net/overseas/engnavi/HomePage.aspx?id=N2012020066&name=YCXME&floor=1>. Дата доступа: 20.11.2017.

⁸ National Bureau of Statistics of China: Data [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.stats.gov.cn/english/statisticaldata/AnnualData>. Дата доступа: 20.11.2017.

⁹ China Statistical Yearbook 2016 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2016/indexeh.htm>. Дата доступа: 20.11.2017. После входа по данному адресу войти в Energy, а затем – в Brief Introduction.

¹⁰ BP Global: Statistical Review: Downloads [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>. Дата доступа: 20.11.2017.

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
			прогноз» BP Energy Outlook (существует только в электронном формате, в БД ULRICHSWEB™ не зарегистрирован) ¹¹ . Первый источник выявлен по ссылкам на сокращения BP STAT REV WORLD EN, STAT REV WORLD EN, STAT REV WORLD EN 20 (всего 43 ссылки), второй – по ссылкам на сокращение BP EN OUTL 2035 (три ссылки). Хотя цифры 2035, присутствующей в сокращении, нет в самом названии, она есть в характеризующем источник реферате на web-сайте: «Энергетический прогноз» описывает «наиболее вероятный» путь для глобальных энергетических рынков до 2035 г. ¹² Для скачивания из BP Statistical Review of World Energy доступны: Статистический обзор мировой энергетики-2017, Статистический обзор мировой энергетики, 1965–2016 – основные данные и Статистический обзор мировой энергетики-2017: пакет слайдов ¹³
World Development Indicators	WORLD DEV IND / 13	http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators	Существующий в электронном варианте ¹⁴ «журнал-ежегодник», размещающий более 800 индикаторов, помещенных в 83 таблицы и организованных по таким секциям, как «Окружающая среда», «Экономика» и др. По существу, это – статистический ежегодник с регулярно обновляемыми данными. Эти данные доступны каждому к свободному скачиванию
International Energy Outlook	INT EN OUL (с указанием и без указания года) / всего 11	https://www.eia.gov/outlooks/teo/	Ежегодник Министерства энергетики США и Управления энергетической информации (в составе Федеральной статистической системы США) (ISSN: 1051-6360), называемый в БД ULRICHSWEB™ отчетом, представляет оценку и долгосрочные перспективы международных энергетических рынков ¹⁵ , с единого адреса по ссылкам открываются отчеты не только последнего года издания, но и предыдущих лет

¹¹ BP Global: BP Energy Outlook [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>.¹² Дата доступа: 20.11.2017.¹³ Там же.¹⁴ См. ссылку 7.¹⁵ World Development Indicators [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>. Дата доступа: 14.11.2017.¹⁶ US Energy Information Administration: International Energy Outlook 2016 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.eia.gov/outlooks/teo/>. Дата доступа: 30.10.2017.

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Intergovernmental Panel on Climate Change Publications and Data	CLIMATE CHANGE 2014, CLIMATE CHANGE MIT, CLIM CHANG 2014 MITI / всего 26	http://www.ipcc.ch/publications_and_data.shtml	Электронный ресурс, являющийся частью web-сайта Межправительственной комиссии по изменению климата (http://www.ipcc.ch/index.htm). Содержит следующие материалы, предполагаемо обозначенные приведенными в колонке 2 сокращениями: 1) IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. Geneva: IPCC, 2015. 151 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf . Дата доступа: 20.11.2017 (по-видимому, соответствует первому сокращению); 2) IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Summary for Policymakers & Technical Summary: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – S.L.: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015. 141 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIII_AR5_SPM_TS_Volume.pdf . Дата доступа: 20.11.2017 и/или 3) IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J. C. Minx (eds.)]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2014. 1435 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf . Дата доступа: 30.10.2017. В сущности, и второй, и третий источники могут соответствовать второму и третьему сокращению из колонки 2, но если второй источник представляет собой «резюме для политиков вклада Рабочей группы III

Окончание табл. 1

1	2	3	4
			в пятый оценочный отчет Международного бюро экспертов по изменению климата» Межправительственной группы экспертов по изменению климата» (перевод фрагментов названия), то третей – полную версию «вклада Рабочей группы III», которая почти в 10 раз толще резюме. Более того, данный ресурс выводит пользователя еще и на не упоминавшийся нами отчет IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge, New York: Cambridge University Press. – 1535 p., который (неизвестно, в полном виде или в виде Summary for Policymakers, т.е. «резюме для политиков») цитировался под обозначением CLIMATE CHANGE 2013, правда, всего пять раз, т.е. меньше порогового уровня
The Guardian	GUARDIAN / 19	https://www.theguardian.com/international	Электронный ресурс открытого доступа – онлайн-версия ежедневной газеты The Guardian ¹⁶ . Нам не удалось уточнить характер цитированных материалов; кроме того, газетные материалы вообще рекомендуются с меньшей уверенностью, так как величина цитируемости, значительная для журнала, не может быть столь же заметной применительно к «толстой» ежедневной газете

¹⁶ Несколько иначе обстоит дело с онлайн-версией ежедневной газеты The Times, которая получила 15 ссылок, но вообще нами не рекомендуется, поскольку в отличие от остальных источников, перечисленных в таблице, включая онлайн версию газеты The Guardian, является платной.

Этот источник, способный послужить и в качестве справочного издания, доступен к свободному скачиванию с персонального блога CruncheeZ¹⁷ по адресу <https://cruncheez.files.wordpress.com/2015/06/thermodynamics-an-engineering-approach-5th-edition.pdf>, и не будь данная книга единственной из выявленных, доступная в настоящее время в сети Интернет к свободному скачиванию, подобные адресные рекомендации могли бы также принести определенную пользу специалистам-энергетикам. Скучность приведенного примера (величина цитируемости данной книги – меньше пороговой; персональный блог – не самый надежный и стабильный источник для скачивания; а учебник – пусть и самый лучший – может показаться сомнительно полезным источником информации именно для ученого) все же, по нашему мнению, не уничтожает полностью его значение; этот же пример подтверждает, что каждую ссылку стоит пытаться идентифицировать до конца.

ВЫВОД

В ходе основанного на использовании цитат-анализа с применением данных Journal Citation Reports® отбора мировых научных сериальных изданий, необходимых для качественного выполнения исследований по энергобезопасности и энергосбережению, энергоэффективным технологиям и технике, выявлено заметное количество несериальных изданий и источников, а также несколько достаточно нетипичных для использования в научной деятельности сериальных изданий. Их использование выглядит при ближайшем рассмотрении логичным, и их следовало бы включить в формируемую авторами по результатам основной части исследования информационную среду. Однако, поскольку почти все эти источники свободно доступны через сеть Интернет, было решено ограничиться выдачей соответствующих рекомендаций специалистам-энергетикам (с краткой аннотированной информацией и адресами доступа). Так как несериальные источники вообще не планировалось включать в информационную среду для специалистов, а их пропорция среди выявленных источников относительно невелика, решение по каждому из них принималось индивидуально. По итогам же отдельно взятых рассмотрений этих (по-видимому, ошибочно) отраженных в Journal Citation Reports® материалов становится ясно, что они являются не «информационным шумом», но полезным дополнением к «кругу чтения» специалистов-энергетиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калюжный, К. А. Информационная среда и информационная среда науки: сущность и назначение / К. А. Калюжный // Наука. Инновации. Образование. 2015. Вып. 18. С. 7–23.
2. О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг.: Указ Президента Респ. Беларусь, 22 апр. 2015 г., № 166 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.scienceportal.org.by/upload/2015/April/SandT.pdf>. Дата доступа: 14.11.2017.
3. Лазарев, В. С. Основные мировые научные журналы в помощь выполнения исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы» / В. С. Лазарев, А. В. Скалабан // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 488–502. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-488-502.

¹⁷ CruncheeZ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cruncheez.wordpress.com/>. Дата доступа: 13.11.2017.

4. Отбор сериальных изданий в помощь исследованиям: на примере научных работ по атомной энергетике / В. С. Лазарев [и др.] // НТИ. Сер. 1. 2017. № 8. С. 29–41.
5. InCites Journal Citation Reports [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://jcr.incites.thomsonreuters.com>. Дата доступа: 14.11.2017.
6. ULRICHSWEB™ Global Serial Directory [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ulrichsweb.serialssolutions.com>. Дата доступа: 14.11.2017.
7. Yurik, I. Serial Publications to Support Research in Energy Security, Energy Conservation and Energy Efficiency Technologies and Techniques [Table]. Version 2 [Электронный ресурс] / I. Yurik, V. Lazarev, N. Dydik. Режим доступа: https://figshare.com/articles/energy_sec_xlsx/5606053/2. Дата доступа: 17.11.2017.
8. EBSCO: Flipster: All your Favorable Digital Magazines [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://flipster.ebsco.com/browse-magazines/P192>. Дата доступа: 26.10.2017.
9. Trade Magazine / Wikipedia: the Free Encyclopedia [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Trade_magazine. Дата доступа: 30.10.2017.
10. Лазарев, В. С. Анализ интенсивности использования книг и продолжающихся изданий гематологами и трансфузиологами при организации библиотечных фондов и изучении развития науки о крови / В. С. Лазарев // Кибернетика и информатика в медицине: сб. науч. статей. Рига: Рижский мед. ин-т, 1983. С. 205–209.
11. Earp, V. J. A Bibliometric Snapshot of the Journal of Higher Education and its Impact on the Field / V. J. Earp // *Behavioral & Social Science Librarian*. 2010. Vol. 29, Iss. 4. P. 283–295. DOI: 10.1080/01639269.2010.521034.

Поступила 27.11.2017 Подписана в печать 29.01.2018 Опубликовано онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Kalyuzhnyi K. A. (2015) Information Environment and Information Environment of Science: Nature and Purpose. *Nauka. Innovatsii. Obrazovanie = Science. Innovation. Education*, (18), 7–23 (in Russian).
2. On Priority Directions of the Research and Technical Activities in the Republic of Belarus for 2016–2020. Decree of the President of the Republic of Belarus. 22 April 2015, No 166. Available at: <http://www.scienceportal.org.by/upload/2015/April/SandT.pdf> (Accessed 14 November 2017) (in Russian).
3. Lazarev V. S., Skalaban A. V. (2016) The World Major Scientific Periodicals to Be Used by Researchers of “Renewable Energy, Local and Secondary Energy Resources”. *Energetika. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 488–502 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-488-502.
4. Lazarev V. S., Skalaban A. V., Yurik I. V., Lis P. A., Kachan D. A. (2017) Selection of Serial Publications to Support Researchers (Based on the Example of Scientific Works on Nuclear Power). *Scientific and Technical Information Processing*, 44 (3), 196–206. DOI: 10.3103/S0147688217030066.
5. InCites Journal Citation Reports. Available at: <https://jcr.incites.thomsonreuters.com> (Accessed 14 November 2017).
6. ULRICHSWEB™ Global Serial Directory. Available at: <https://ulrichsweb.serialssolutions.com> (Accessed 14 November 2017).
7. Yurik I., Lazarev V., Dydik N. (2017) Serial Publications to Support Research in Energy Security, Energy Conservation and Energy Efficiency Technologies and Techniques [Table]. Version 2. Available at: https://figshare.com/articles/energy_sec_xlsx/5606053/2 (Accessed 17 November 2017).
8. EBSCO: Flipster: All Your Favorable Digital Magazines. Available at: <https://flipster.ebsco.com/browse-magazines/P192> (Accessed 26 October 2017).
9. Trade Magazine. *Wikipedia: the Free Encyclopedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Trade_magazine (Accessed: 30 October 2017).
10. Lazarev V. S. (1983) Analysis of the Intensity of Use of Books and Serials by Hematologists and Transfusiologists while Managing Library Stocks and Studying the Development of the Science of Blood. *Kibernetika i Informatika v Meditsine: Sb. Nauch. Statei* [Cybernetics and Informatics in Medicine: Collected Research Papers]. Riga, Riga Medical Institute, 205–209 (in Russian).
11. Earp V. J. (2010) A Bibliometric Snapshot of The Journal of Higher Education and Its Impact on the Field. *Behavioral & Social Science Librarian*, 29 (4), 283–295. DOI: 10.1080/01639269.2010.521034.

Received: 27 November 2017 Accepted: 29 January 2018 Published online: 30 March 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-179-188

УДК 621.182, 176; 627.32

Оценка состояния и анализ повреждаемости трубопроводов тепловых сетей

Н. В. Пантелей¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Тепловые сети предназначены для транспортировки тепловой энергии от источников теплоты к потребителям. На балансе энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго», входящего в состав Министерства энергетики Республики Беларусь, находится более 6500 км тепловых сетей в однотрубном исчислении. Анализ результатов комплексных обследований теплоснабжающих предприятий Беларуси показывает, что тепловые сети являются сегодня одним из самых ненадежных элементов системы теплоснабжения города. Основная причина нарушений в работе тепловых сетей (около 90 %) – локальная наружная коррозия, проявляющаяся в виде свищей и разрывов металла сетевых трубопроводов. Наиболее быстро, при прочих равных условиях, наружной коррозией поражаются те теплопроводы, в которых имеется прямой контакт незащищенной поверхности трубы с грунтом. Кроме того, при эксплуатации тепловых сетей возможны повреждения, связанные со срывом неподвижных опор, с разрывами корпусов чугунных задвижек, со срывом резьбы спускных кранов, с повреждениями компенсаторов и т. д. По данным статистических исследований ОРГРЭС, большая часть повреждений (до 70 %) трубопроводов в России (так же как и в Беларуси) связана с коррозией. Несмотря на расчетный срок эксплуатации трубопроводов (до 30 лет), источники централизованного теплоснабжения в России более чем на 70 % выработали свой ресурс. В связи с этим значительно выросли потери в теплосетях. Общий износ теплосетей Украины уже в 2010 г. составил 70 %, а потери в теплосетях доходят до 30 %. С каждым годом ситуация только усугубляется. Таким образом, наружная коррозия тепловых сетей является одним из основных факторов, определяющих надежность эксплуатации систем теплоснабжения.

Ключевые слова: тепловые сети, трубопроводы, наружная коррозия, удельная повреждаемость, надежность, срок эксплуатации

Для цитирования: Пантелей, Н. В. Оценка состояния и анализ повреждаемости трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Пантелей // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 179–188. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-179-188

Assessment of the State and Analysis of Damageability of Heating Grids Pipelines

N. V. Panteley¹⁾

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

Abstract. Heating grids are intended for transportation of thermal energy from heat sources to consumers. On the balance sheet of the power supply organizations of the state enterprise

Адрес для переписки

Пантелей Наталья Всеволодовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Address for correspondence

Panteley Natal'ya V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

“Belenergo”, which is part of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus, there is more than 6500 km of heating grids in one-pipe terms. Analysis of the results of complex surveys of heat supply enterprises in Belarus shows that heating grids are one of the most unreliable elements of the heating system of the city today. The main reason of disturbances in operation of heating grids (about 90 %) is the local external corrosion that manifests itself in the form of fistulas and breaks of metal of network pipelines. The most quickly, all other things being equal, external corrosion affects those pipelines in which there is a direct contact of the unprotected surface of the pipe with the ground. In addition, in the process of operation of heating grids possible damages might happen that are associated with the breakdown of stationary pillars, with the gaps of the buildings cast iron valves, with the breakdown of the thread of the discharge valves, with damage of compensators, etc. According to ORGRES statistical studies, most of the damages (up to 70 %) of pipelines in Russia (as well as in Belarus) are associated with corrosion. Despite the estimated service life of the pipelines (up to 30 years), the sources of centralized heat supply in Russia pipes are 70 % worn out. With this regard, losses significantly increased in heating grids. General wear and tear of the heating grids of Ukraine in 2010 was 70 %, while losses in heating grids reached up to 30 %. Every year, the situation will only get worse. Thus, external corrosion of heating grids is one of the main factors determining reliability of operation of systems of heat supply.

Keywords: heating grids, pipelines, external corrosion, specific damageability, reliability, service life

For citation: Panteley N. V. (2018) Assessment of the State and Analysis of Damageability of Heating Grids Pipelines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 179–188. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-179-188 (in Russian)

Введение

Тепловые сети, являясь составной частью системы централизованного теплоснабжения современных городов, представляют собой сложные инженерные сооружения, предназначенные для транспортировки тепловой энергии от источников теплоты к потребителям [1]. Основными элементами тепловых сетей являются:

- трубопровод, состоящий из стальных труб, соединенных между собой с помощью сварки;
- изоляционная конструкция, предназначенная для защиты трубопровода от наружной коррозии и тепловых потерь;
- несущая конструкция, воспринимающая вес трубопровода и усилия, возникающие при его эксплуатации.

Трубы – наиболее ответственные элементы трубопровода и должны отвечать следующим требованиям:

- достаточная прочность и герметичность при максимальных значениях давления и температуры теплоносителя;
- низкий коэффициент температурных деформаций, обеспечивающий небольшие термические напряжения при переменном тепловом режиме тепловой сети;
- малая шероховатость внутренней поверхности;
- антикоррозионная стойкость;
- высокое термическое сопротивление стенок трубы, способствующее сохранению теплоты и температуры теплоносителя;

- неизменность свойств материала при длительном воздействии высоких температур и давлений;
- простота монтажа, надежность соединения труб и др.

Анализ результатов комплексных обследований теплоснабжающих предприятий Республики Беларусь показывает, что тепловые сети являются сегодня одним из самых ненадежных элементов системы теплоснабжения города. Имеющиеся стальные трубы не удовлетворяют в полной мере всем предъявляемым требованиям, однако их механические свойства, простота, надежность и герметичность соединений (сваркой) обеспечили им преимущественное применение в тепловых сетях [2].

В настоящее время основная проблема, встающая при эксплуатации трубопроводов тепловых сетей, – коррозия. Она является одним из основных факторов, определяющих надежность эксплуатации систем теплоснабжения. Причем трубопроводы подвергаются воздействию как наружной, так и внутренней коррозии.

Виды наружной коррозии тепловых сетей

Основная причина нарушений работы тепловых сетей – локальная наружная коррозия атмосферного типа, проявляющаяся в виде свищей и разрывов металла сетевых трубопроводов и вызванная как длительным сроком эксплуатации, так и состоянием стыков плит перекрытий каналов.

Определяющие факторы проявления локальной наружной коррозии следующие:

- влияние влаги и блуждающих токов из-за недостатков в строительных конструкциях;
- отсутствие катодных станций;
- низкое качество заделки стыков при строительстве каналов;
- длительная эксплуатация инженерных сооружений тепловых сетей;
- неудовлетворительное качество гидроизоляции перекрытий;
- нарушение герметичности стыковых соединений строительных конструкций, так как при длительной эксплуатации строительные конструкции (лотки, своды) подвержены механическим подвижкам (проседание грунта, воздействие транспорта), которые разрушают цементные заделки.

Атмосферная коррозия связана с наличием на поверхности металла видимой влажной пленки. Наиболее заметна такая коррозия в тепловых камерах, в которых удельная повреждаемость в 10–20 раз больше, чем на остальных участках трубопроводов [3, 4]. Следует отметить, что скорость коррозии резко возрастает при влажности 55–65 %. Основная причина этого – наличие конденсата, образующегося на холодных перекрытиях, находящихся у поверхности. Капли воды попадают на трубопроводы через неплотности крышек люков, и как следствие – интенсивная коррозия металла трубопровода. При расположении камер под дорогами на процесс коррозии оказывает влияние еще и соль, попадающая на трубопроводы вместе с водой.

Еще одна причина атмосферной коррозии – попадание на трубопровод капель воды с перекрытий. В трубопроводах неизбежны протечки воды

через сальниковые уплотнения задвижек. Это приводит к тому, что в таких местах влажность воздуха может достигать 100 %, что в свою очередь при высокой температуре теплоносителя приводит к появлению конденсата на поверхности металла трубопровода. Данному виду мокрой атмосферной коррозии наиболее подвержены нижние участки трубопроводов, обращенные к грунту.

Также следует обратить внимание еще на один вид коррозии. Это почвенная коррозия металла трубопровода под слоем изоляции. При попадании капель влаги с перекрытий на поверхность изолированного трубопровода образуются участки с различной влажностью по длине трубопровода. Это приводит к неодинаковой кислородной проницаемости, так как скорость конвекционной и диффузионной подачи кислорода по порам, наполненным воздухом, на несколько порядков выше, чем скорость подачи кислорода по порам с жидкостью.

Трубопроводы тепловых сетей в процессе эксплуатации подвергаются также электрической коррозии, возникающей при воздействии на них электрического тока, движущегося в грунте. В грунт токи попадают в результате утечек из рельсов электрифицированного транспорта – их называют блуждающими. Попадая на трубопровод, они движутся по нему, а вблизи тяговой подстанции выходят из трубопровода в грунт, образуя очаги электрокоррозии [5].

Анализ повреждаемости трубопроводов в Беларуси

Анализ работы трубопроводов тепловых сетей, по данным учета в филиалах ГПО «Белэнерго», показал, что в последние годы в Беларуси прослеживается динамика увеличения общего числа повреждений труб различных диаметров (магистральных, квартальных, распределительных), используемых в тепловых сетях. Некоторое снижение повреждений с 2727 до 1671 наблюдалось в период с 2003 по 2008 г., но начиная с 2008-го, число повреждений в тепловых сетях стало значительно расти. Так, в 2008 г. общее число повреждений составило 1671, в 2009 г. – 1756, в 2010 г. – 1845, в 2011 г. – 2030, в 2012 г. – 2246, в 2013 г. – 2455, в 2014 г. – 2586, в 2015 г. – 2436 случаев (рис. 1).

По данным ГПО «Белэнерго», основной причиной отказов и повреждений в работе тепловых сетей является локальная наружная коррозия. Эта цифра постоянно увеличивается. Сравнительный анализ повреждений показывает, что наружная коррозия, как одна из составляющих причин отказов, в последние годы начала расти и достигла 75 % в 2006 г. и 85 % в 2007-м. К настоящему времени эта цифра достигла практически 90 %. Наибольшая общая повреждаемость сетей от наружной коррозии в сравнении с другими причинами приходится на г. Минск (92–93 %). Это в первую очередь связано с тем, что минские теплосети являются весьма сложным комплексом с непростым режимом эксплуатации и имеют наибольшую протяженность.

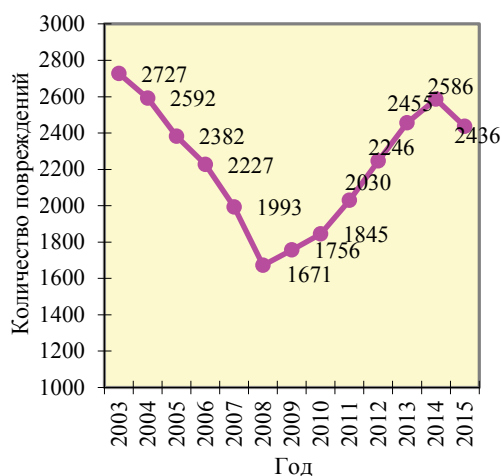


Рис. 1. Количество повреждений трубопроводов за 2003–2015 гг.

Fig. 1. Number of pipeline damages for 2003–2015

Одной из характеристик отказов оборудования теплосетей можно назвать удельную повреждаемость трубопроводов, которая представляет собой отношение общего числа повреждений к протяженности тепловых сетей. В последние годы наблюдается рост удельной повреждаемости трубопроводов, возросшей с 0,310 в 2008 г. до 0,435 в 2014-м. В 2015 г. произошло некоторое снижение данного показателя до 0,399 (рис. 1). Это можно объяснить значительным и стабильным ростом доли ПИ-трубопроводов в общем объеме тепловых сетей: 2010 г. – 13,87 %, 2011 г. – 16,20 %, 2012 г. – 20,80 %, 2013 г. – 23,50 %, 2014 г. – 26,40 %, 2015 г. – 28,63 %. Значения удельной повреждаемости в период 2010–2014 гг. приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Протяженность и удельная повреждаемость тепловых сетей

The length and specific damageability of heating grids

Наименование РУП-обл-энерго	Протяженность тепловых сетей L , км, по годам (в том числе ПИ-трубы)					Удельная повреждаемость на 1 км тепловых сетей (n/L) по годам				
	2010	2011	2012	2013	2014	2010	2011	2012	2013	2014
Брест-энерго	491,50 (87,40)	510,80 (100,00)	521,10 (117,00)	531,65 (131,00)	548,00 (156,50)	0,240	0,327	0,307	0,430	0,392 ↓
Витебск-энерго	766,20 (143,50)	819,28 (169,00)	846,46 (184,00)	859,77 (205,00)	889,701 (224,7,000)	0,320	0,390	0,488	0,501	0,450 ↓
Гомель-энерго	674,30 (143,00)	728,50 (190,00)	754,70 (215,00)	748,65 (226,00)	759,16 (250,45)	0,190	0,196	0,216	0,248	0,300 ↑
Гродно-энерго	559,60 (143,20)	588,03 (168,00)	614,47 (189,00)	629,20 (213,00)	645,78 (244,10)	0,250	0,293	0,380	0,325	0,345 ↑
Минск-энерго	2690,20 (155,60)	2653,20 (189,00)	2362,50 (324,00)	2431,00 (428,00)	2454,22 (511,21)	0,410	0,407	0,470	0,487	0,546 ↑
Могилев-энерго	563,20 (123,40)	577,91 (136,36)	602,21 (153,40)	618,10 (164,40)	632,83 (179,70)	0,140	0,246	0,259	0,353	0,281 ↓
Итого по ГПО «Бел-энерго»	5741,30 (796,30)	5877,70 (953,00)	5701,40 (1184,00)	5818,50 (1368,00)	5923,71 (1566,60)	0,321	0,345	0,394	0,420	0,435 ↑

Детальный анализ возрастной структуры тепловых сетей указывает еще на одну проблему – старение сетей. Так, более 40 % эксплуатируемых теплосетей имеют срок службы больше назначенного (свыше 25 лет), полностью амортизированы и подлежат замене. Несмотря на ежегодный рост замены трубопроводов тепловых сетей, ситуация кардинально не меняется, и в ближайшие годы количество сетей, отработавших назначенный срок службы, составит более половины. Данные о протяженности тепловых сетей сроком эксплуатации более 25 лет и их процентное соотношение к общей протяженности тепловых сетей по РУП-облэнерго и по ГПО «Белэнерго» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Протяженность тепловых сетей со сроком эксплуатации более 25 лет**Length of heating grids with a service life more than 25 years**

Наименование РУП-облэнерго	Протяженность тепловых сетей, км (% к общей протяженности)					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Брестэнерго	180,54	206,60	209,80 (40,30)	215,08 (40,45)	229,25 (41,38)	235,20 (40,48↓)
Витебскэнерго	134,71	143,60	150,37 (17,80)	162,90 (18,95)	162,416 (18,250)	169,70 (18,76↑)
Гомельэнерго	112,10	165,80	170,70 (22,60)	178,50 (23,80)	184,20 (24,20)	250,10 (31,80↑)
Гродноэнерго	265,39	283,30	289,90 (47,20)	289,70 (46,70)	291,00 (45,10)	294,10 (44,20↓)
Минскэнерго	324,17	276,30	1568,80 (66,30)	1561,90 (64,20)	1510,76 (61,55)	1558,51 (62,50↑)
Могилевэнерго	194,34	194,80	212,06 (35,20)	226,20 (36,60)	237,20 (37,48)	245,75 (38,30↑)
ГПО «Белэнерго»	1211,30	1270,40	2601,63 (45,60)	2635,80 (45,30)	2615,19 (44,15)	2757,32 (45,25↑)

Анализ данных табл. 2 показывает, что, несмотря на существенные объемы капитальных ремонтов теплосетей с заменой трубопроводов, «балансовое» старение с каждым годом увеличивается. Высокий показатель изношенности сетей наблюдается на РУП «Минскэнерго» (62,50 %), РУП «Гродноэнерго» (44,20 %), РУП «Брестэнерго» (40,48 %). В среднем по ГПО «Белэнерго» эта цифра составляет 45,25 %. Данные о возрастном составе тепловых сетей по состоянию на 01.01.2017, находящихся на балансе ГПО «Белэнерго», приведены на рис. 2.

Следует отметить, что локальная наружная коррозия наблюдается на трубопроводах не только после наработки более 25 лет, но и намного раньше – в зависимости от качества строительных работ. При обследованиях (например, в минских теплосетях) выявились случаи, когда из-за удешевления строительно-монтажных работ не всегда производилась гидроизоляция нижних лотков каналов, тем самым создавались условия затопливаемости и повышения влажности в каналах от грунтовых вод. Так, по данным 2006 г., из 16 отказов в работе оборудования теплосетей 11 из них

произошли на трубах, эксплуатируемых 25 лет и более (68,75 %), четыре отказа – после срока службы от 15 до 20 лет (25,00 %) и один отказ – после 10 лет эксплуатации (60,25 %).

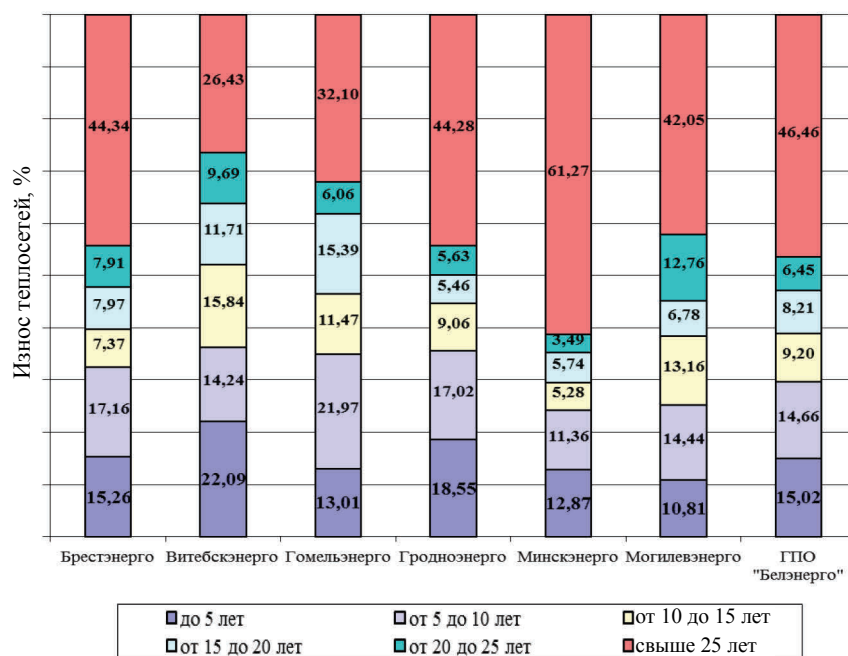


Рис. 2. Возрастной износ тепловых сетей по состоянию на 01.01.2017, находящихся на балансе предприятий ГПО «Белэнерго»

Fig. 2. Age depreciation of heating grids as of 01.01.2017, which are on the balance sheet of enterprises of "Belenergo" public electricity production association

Особенно активно коррозионные процессы развиваются на подающем трубопроводе (до 87,5 %), что связано с более высокой температурой теплоносителя. В частности, из-за вскипания воды в пристенном слое и внутри продуктов коррозии происходит их разрушение и проникновение воды к не прокорродированным слоям металла. В 14 случаях повреждения обнаруживались на трубопроводах прямой сетевой воды и в двух случаях – на трубопроводах обратной сетевой воды, что составляет 87,5 и 12,5 % соответственно (данные 2006 г.); в 2002 г. шесть случаев приходилось на подающие трубы и лишь один случай – на обратный трубопровод (87,5 и 14,3 %).

Одной из конструктивных особенностей трубопровода является способ его прокладки – канальный или бесканальный. При бесканальной прокладке трубопровод (в частности, его изоляция) имеет прямой контакт с окружающим грунтом. Следует отметить, что тепломагистрали в основном выполнены только в канальном или наружном исполнении, следовательно, атмосферная и почвенная коррозии для них являются преобладающими.

Анализируя данные ГПО «Белэнерго», можно отметить, что в большинстве случаев наружная коррозия имеет локальный характер и сосредотачивается на участках труб длиной 1,0–1,5 м, охватывая не более 25–35 % пе-

риметра трубы, главным образом в нижней части. В проходных каналах и камерах коррозия верхней части труб происходит в результате интенсивной капли с перекрытия, а нижней части – при подтоплении и заносе грунтом. Удельная повреждаемость уменьшается с увеличением толщины стенок труб. Наблюдается повреждаемость в линейной части теплопроводов и у неподвижных опор. Высокая удельная повреждаемость подземных теплопроводов может возникать главным образом из-за плохого качества применяемых антикоррозионных покрытий наружной поверхности.

Основным недостатком как существующих, так и ранее применяемых подземных тепловых сетей является гидрофильность тепловой изоляции. Проникающая в изоляцию влага вызывает коррозионные разрушения труб, увеличивает тепловые потери теплопроводами. На участках примыкания теплопроводов к теплофикационным камерам наблюдаются оплывание мастичного слоя, полное расслаивание гидроизоляции и увлажнение тепловой изоляции. Вскрытия и обследования показали, что наиболее частое повреждение изоляции и коррозия стальных труб проявляются именно в этих местах. В результате проведенного анализа установлено, что повреждаемость тепловых сетей весьма велика и имеет явно выраженную тенденцию к дальнейшему росту по мере старения сетей.

Анализ повреждений трубопроводов в России и на Украине

На сегодняшний день протяженность тепловых сетей России составляет около 180 тыс. км (в двухтрубном исчислении). В системах теплоснабжения используются трубопроводы диаметрами от 57 до 1400 мм [6, 7].

В настоящее время источники централизованного теплоснабжения в России более чем на 70 % выработали свой ресурс. В связи с этим значительно выросли потери в теплосетях: они составляют около 20 % вместо нормируемых 5 %. Как следствие – рост повреждаемости тепловых сетей – более двух повреждений на 1 км [8].

По данным статистических исследований ОРГРЭС, большая часть повреждений (до 70 %) трубопроводов в России (так же как и в Беларуси) связана с коррозией. Несмотря на расчетный срок эксплуатации трубопроводов, который составляет до 30 лет, первые сквозные повреждения могут появляться уже после 10 лет эксплуатации трубопроводов (до 10 %), а иногда – и значительно раньше. Выявлены случаи сквозных повреждений трубопроводов уже после двух-трех лет эксплуатации [9].

Согласно материалам вскрытия трубопроводов теплосетей Мосэнерго, коррозионные разрушения наблюдаются практически на 70 % вскрываемых участков. При этом на 40 % участков была обнаружена равномерная коррозия металла трубопроводов. В ряде случаев наблюдались язвы и каверны с глубиной повреждений до 3 мм, в результате которых впоследствии на 10 % стен трубопроводов были обнаружены сквозные свищи [9].

В теплосетях Ленэнерго эксплуатируются трубы, проложенные в монолитном автоклавном армопенобетоне. По результатам исследований про-

изводственной лаборатории теплосетей Ленэнерго было выявлено, что коррозионные повреждения наблюдаются в основном на подающем трубопроводе. Из 118 шурфов в 70 случаях (60 %) наблюдались сильные коррозионные повреждения (включая свищи), причем они в основном располагались в местах прохода трубопровода из грунта в камеру. Процент повреждений на линейных участках трубопроводов составил около 8 % [9].

В коммунальной теплоэнергетике Украины эксплуатируется 34,6 тыс. км магистральных и распределительных тепловых сетей в двухтрубном исчислении различного диаметра (от 50 до 800 мм). При прокладке трубопроводов используются непроходные железобетонные каналы, а в качестве тепловой изоляции преимущественно применяется минеральная вата.

Рассматривая состояние теплосетей Украины, следует отметить, что уже в 2010 г. более 3000 км трубопроводов находилось в аварийном состоянии, еще 7700 км превышало допустимый срок эксплуатации. Таким образом, общий износ теплосетей Украины уже в 2010 г. составил 70 %, а потери в теплосетях доходят до 30 %. С каждым годом ситуация только усугубляется.

Из-за недостаточного финансирования на Украине ежегодно уменьшается плановая замена старых теплосетей (от 20 до 40 % от нормативного количества). Проблемы существуют в системах теплоснабжения большинства городов (Киев, Житомир, Харьков, Ровно, Днепропетровск и др.). В связи с этим растет удельная повреждаемость теплосетей, которая составляет порядка 26 % в год [10].

ВЫВОДЫ

1. Основная причина нарушений в работе тепловых сетей – локальная наружная коррозия атмосферного типа, проявляющаяся в виде свищей и разрывов металла сетевых трубопроводов. Локальная наружная коррозия обусловлена влиянием влаги и блуждающих токов при неудовлетворительных конструкциях, низкой культуре прокладки сетей и отсутствии стойких антикоррозионных покрытий.

2. Несмотря на существенные ежегодные объемы капитальных ремонтов теплосетей с заменой трубопроводов, «балансовое» старение с каждым годом увеличивается. Детальный анализ возрастной структуры тепловых сетей указывает на их старение. Так, более 40 % эксплуатируемых трубопроводов в тепловых сетях имеют срок службы свыше 25 лет, полностью амортизированы и подлежат замене. Опасение вызывает ситуация, сложившаяся в минских тепловых сетях, где износ трубопроводов составляет более 60 %.

3. Произведенный анализ повреждений трубопроводов России и Украины показал, что системам теплоснабжения этих стран присущи те же проблемы, что и в Беларуси, а именно: старение трубопроводов тепловых сетей, плохая изоляция, некачественное выполнение монтажных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина, И. К. Справочник по трубопроводам тепловых сетей / И. К. Никитина. М.: Энергоатомиздат, 1983. 177 с.
2. Тепловое оборудование и тепловые сети / Б. Г. Тувальбаев [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1988. 400 с.
3. Воронин, С. М. К вопросу о вентиляции камер и каналов тепловых сетей / С. М. Воронин // Новости теплоснабжения. 2001. № 8. С. 19–24.
4. Пашенко, Е. И. Анализ причин снижения ресурса тепловых сетей / Е. И. Пашенко // Новости теплоснабжения. 2002. № 12. С. 33–35.
5. Защита тепловых сетей от внешней коррозии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://msd.com.ua/teplosnabzhenie/zashhita/teplovyyh-setej/ot-naruzhnoy-korrozii>. Дата доступа: 27.01.2018.
6. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
7. Рапопорт, Я. Тепловые сети: ждать нельзя модернизировать / Я. Рапопорт, А. Шмелев, М. Барановский // Полимерные трубы. 2011. № 2. С. 16–17.
8. Титов, Г. И. Причины повреждаемости тепловых сетей / Г. И. Титов, Н. А. Новопашина, В. Г. Титов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. № 2. С. 19–22.
9. Пригула, В. В. Коррозионная ситуация на трассах городских трубопроводов / В. В. Пригула // Новости теплоснабжения. 2014. № 6. С. 40–45.
10. Покровский, Л. Л. Стратегия развития коммунальной теплоэнергетики Украины на период до 2030 года / Л. Л. Покровский, Г. М. Семчук, П. Ю. Зембицкий // Новости теплоснабжения. 2010. № 9. С. 50–55.

Поступила 18.04.2017 Подписана в печать 06.07.2017 Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Nikitina I. K. (1983) *Reference-Book on Pipelines of Calorific Nets*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 177 (in Russian).
2. Tuval'baev B. G., Belousov V. P., Marchenko E. M., Dranchenko A. A., Arsen'ev G. V., Ibragimov M. Kh. (1988) *Thermal Equipment and Heating Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 400 (in Russian).
3. Voronin S. M. (2001) Towards the Problem of Ventilation of Chambers and Channels of Heating Networks. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (8), 19–24 (in Russian).
4. Pashchenko E. I. (2002) Analysis of the Reasons for Reducing the Resource of Heating Networks. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (12), 33–35 (in Russian).
5. *Protection of Heat Networks Against External Corrosion*. Available at: <http://msd.com.ua/teplosnabzhenie/zashhita-teplovyyh-setej-ot-naruzhnoy-korrozii/> (Accessed 27 January 2018) (in Russian).
6. Sokolov E. Ya. (2001) *Central Heating and Heating Networks*. Moscow, MPEI Publ. 472 (in Russian).
7. Rapoport Ya., Shmelev A., Baranovskii M. (2011) Heating Networks: Waiting Inadmissibly Upgrading. *Polimernye Truby = Plastic Pipes*, (2), 16–17 (in Russian).
8. Titov G. I., Novopashina N. A., Titov V. G. (2016) The Causes of Thermal Networks Damageability. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i Arkhitektura = Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture*, (2), 19–22 (in Russian).
9. Pritula V. V. (2014) Corrosive Situation on the Routes of City Pipelines. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (6), 40–45 (in Russian).
10. Pokrovsky L. L., Semchuk G. M., Ziembicki P. Yu. (2010) Strategy of Development of Municipal Heat Power Engineering of Ukraine for the Period up to 2030. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (9), 50–55 (in Russian).

Received: 18 April 2017

Accepted: 6 July 2017

Published online: 30 March 2018