

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 60, № 2
2017

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Романюк Ф. А., Сапожникова А. Г. Принципы выполнения блокировки токовой защиты электроустановок с силовыми трансформаторами	101
Анищенко В. А. Надежность и точность троированных измерений аналоговых технологических переменных	108
Криксин П. В. Методы измерения влияний молнии путем имитации ее ударов с интервальной оценкой результатов измерений	118
Нго Фыонг Ле. Расчет индуктивностей синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами	133

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Хрусталеv Б. М., Пехота А. Н. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения	147
Ищенко А. А., Кравченко В. М., Дашко Е. В., Какарека Д. Л. Новые технологии восстановления и защиты энергетического оборудования композитными материалами	159
Герасимова А. Г., Мальгин А. В., Александр Ю. Н., Криксина Е. Н. Определение необходимых условий эффективной работы системы шариковой очистки труб конденсаторов паровой турбины (Часть 1)	167
Шон Тхай Нгок, Во Ти Тинь. Решение задачи использования подземной воды для охлаждения животноводческих помещений	176

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

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

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

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

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

Подписано к печати 07.03.2017. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз.
Дата выхода в свет . 2017. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 60, No 2
2017

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

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

The Journal is included in the following databases:
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Romaniuk F. A., Sapozhnikova A. G. Principles of Implementation of Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers	101
Anishchenko V. A. The Reliability and Accuracy of the Triple Measurements of Analog Process Variables	108
Kriksin P. V. Methods of Measuring the Effects of Lightning by Simulating its Strikes with the Interval Assessment of the Results of Measurements.	118
Ngo Phuong Le. Calculation of Inductance of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor	133

HEAT POWER ENGINEERING

Khroustalev B. M., Pekhota A. N. Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems	147
Ischenko A. O., Kravchenko V. M., Dashko O. V., Kakareka D. V. New Technologies for Restoration and Protection of Power Equipment with the Aid of Composite Materials	159
Gerasimova A. G., Malgin A. V., Aleksandr Yu. N., Kriksina Ye. N. The Detection of the Necessary Conditions of Effective Functioning of the Ball Cleaning System of the Tubes of Steam Turbine Condensers. Part 1	167
Shon Thay Ngok, Tin Vo Ti. The Solution to the Problem of Using Ground Water to Cool Livestock Buildings	176

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

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

Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

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

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

Passed for printing 07.03.2017. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 250 copies. Date of publishing 2017. Order list .

ADDRESS

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

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

© Belarusian National Technical University, 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-101-107

УДК 621.316.94

Принципы выполнения блокировки токовой защиты электроустановок с силовыми трансформаторами

Ф. А. Романюк¹⁾, А. Г. Сапожникова¹⁾

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

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

Реферат. Рассмотрены принципы выполнения токовой защиты элементов электроэнергетических систем с силовыми трансформаторами. В электроустановках с силовыми трансформаторами в ряде случаев возникает бросок тока намагничивания, который может вызвать ложное срабатывание токовой защиты. Для того чтобы избежать этого, принимают специальные меры по блокировке данной защиты при наличии броска тока намагничивания. В статье описаны способы реализации блокировок цифровых токовых защит при бросках тока намагничивания. Основной способ выполнения блокировки защиты при броске тока намагничивания заключается в отстройке по гармоникам. Наличие гармоник низшего порядка выступает критерием, разрешающим срабатывание защиты, а содержание гармоник высшего порядка, наоборот, свидетельствует о появлении броска тока намагничивания и используется для блокировки ее действия. Приведено условие срабатывания блокировки цифровой защиты при броске тока намагничивания. Описана реализация и рассмотрена функциональная схема цифровой части реализации блокировок токовых защит. В схеме содержатся формирователи ортогональных составляющих сигналов первой и второй гармоники, фильтры прямой и обратной последовательностей, блоки определения амплитуд, в которых по указанным ортогональным составляющим вычисляются амплитуды тока первой гармоники прямой последовательности и тока второй гармоники обратной последовательности. По указанным величинам вычисляется параметр блокировки, который сравнивается с уставкой срабатывания. Предложено усовершенствование принципов выполнения блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами при броске тока намагничивания путем добавления в функциональную схему цифровой части блока формирования максимального значения, который определяет наибольшую амплитуду первой гармоники полного тока.

Ключевые слова: энергетика, максимальная токовая защита, релейная защита, бросок тока намагничивания

Для цитирования: Романюк, Ф. А. Принципы выполнения блокировки токовой защиты электроустановок с силовыми трансформаторами / Ф. А. Романюк, А. Г. Сапожникова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 2. С. 101–107. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-101-107

Адрес для переписки

Романюк Федор Алексеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Fiodar A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

Principles of Implementation of Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers

F. A. Romaniuk¹⁾, A. G. Shapozhnikova¹⁾

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

Abstract. Principles of implementation of current protection of elements of electric power systems with power transformers are considered. In some cases, in facilities with power transformers there could be an inrush of a magnetizing current that can cause a false positive current protection. The special measures of blocking of current protection ought to be taken to avoid this. The methods of implementation of blocking digital current protection when magnetizing current inrush takes place are described. The main way of blocking protection from magnetizing current inrush is tuning-out by harmonics content. The presence of lower harmonics content serves as a criterion of permitting operation of the protection and the higher harmonics content, on the contrary, indicates the appearance of magnetizing current inrush and is used to block the protection action. The operation condition of blocking of digital protection from magnetizing current inrush is presented. A realization of digital part of implementation of current protection blocking is described and the functional scheme of the latter is considered. The scheme contains conditioners of orthogonal components of signals of the first and second harmonics as well as the filters of positive and reverse sequences and blocks of determination of amplitudes. The blocks compute current amplitudes of first harmonic of positive sequence and the negative sequence current of the second harmonic with the use of the orthogonal components. By these values the characteristic quantity of blocking is calculated, which is compared with the activation setpoint. The improvement of performance of the principles of blocking current protection of electric transformers with current magnetizing inrush has been suggested by incorporating the digital part the block of the maximum value formation that determines the maximum amplitude of the first harmonic of the total current into the functional block scheme.

Keywords: power engineering, maximum current protection, relay protection, magnetizing current inrush

For citation: Romaniuk F. A., Shapozhnikova A. G. (2017) Principles of Implementation of Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (2), 101–107. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-101-107 (in Russian)

Введение

В электроустановках с силовыми трансформаторами при включении их в работу, в циклах автоматического повторного включения, автоматического ввода резерва, при восстановлении напряжения после отключения внешних коротких замыканий (КЗ) и в ряде других случаев возникает бросок тока намагничивания (БТН), который может достигать десятикратных значений по отношению к номинальному [1]. В каждой из фаз БТН отличается по ее величине, гармоническому составу, форме и затухает достаточно медленно. Переходный процесс при БТН является несимметричным режимом. Обычно токи в двух фазах однополярны, максимальны по величине и содержат апериодическую составляющую, основную гармонику, а также спектр высших гармоник. В третьей фазе ток меньше, практически не содержит апериодическую составляющую и характеризуется существенным содержанием высших гармоник [2].

Под действием БТН токовые защиты могут срабатывать ложно. Вероятность ложных срабатываний тем больше, чем выше чувствительность и быстродействие защиты. Избежать этого можно либо увеличением параметров срабатывания токовых защит, что не всегда приемлемо по условиям чувствительности к КЗ и быстродействия, либо принятием специальных мер по их блокировке при наличии БТН.

В основе классического способа выполнения блокировки защиты при БТН лежит отстройка по гармоникам. Наличие гармоник низшего порядка может выступать критерием, разрешающим срабатывание защиты, а содержание гармоник высшего порядка, наоборот, свидетельствовать о появлении БТН с использованием его для блокировки действия защиты. Для цифровых устройств защиты условие срабатывания блокировки может быть записано следующим образом:

$$\frac{I_{кг}}{I_{кф}} > K_{бл}, \quad (1)$$

где $I_{кг}$ – комбинированный гармонический ток в токе фазы; $I_{кф}$ – комбинированный ток фазы; $K_{бл}$ – уставка срабатывания.

Наиболее простая реализация (1) заключается в использовании амплитуды тока второй гармоники в токе данной фазы в качестве комбинированного гармонического тока и амплитуды основной гармоники в токе той же фазы в качестве комбинированного тока фазы.

Другая реализация (1) состоит в использовании в качестве комбинированного тока фазы его действующего значения.

В случае применения данных способов формирования величин проверки условия срабатывания блокировки (1) осуществляется одновременно отдельно для каждой фазы. Для определения необходимости действия блокировки при идентификации БТН по одной из фаз необходима реализация дополнительной логики. Действие токовой защиты в этом случае может быть скорректировано использованием перекрестной блокировки или путем применения оценки суммы гармоник по трем фазам.

Основная часть

Приведенные в [3] результаты исследований показали, что использование для выполнения блокировки защиты суммы гармоник по трем фазам является наиболее эффективным решением. При этом действующее значение тока может определяться только с учетом гармоник низшего порядка. Основные положения по выполнению такой блокировки представлены в [4]. При их разработке принято во внимание следующее.

В трехфазных системах в симметричных режимах первые гармоники частотой 50 Гц в фазных токах образуют прямую последовательность, а вторые частотой 100 Гц – обратную [2]. При возникновении несимметрии, например при несимметричных КЗ, в фазных токах указанных систем появляются составляющие обратной последовательности других частот, в основном 50 Гц.

В основе вычисления симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей лежит суммирование значений фазных токов с соответствующими коэффициентами [4]. Благодаря этому будет обеспечено выполнение блокировки защиты суммы гармоник по трем фазам.

С учетом изложенного выше одна из реализаций (1) заключается в использовании амплитуды тока второй гармоники обратной последовательности I_{m22} в качестве комбинированного гармонического сигнала и амплитуды тока первой гармоники прямой последовательности I_{m11} в качестве комбинированного сигнала. В микропроцессорной токовой защите электроустановок выполнение такой блокировки организуется следующим образом.

Вторичные полные токи фаз электроустановки i_a, i_b, i_c , поступающие от измерительных трансформаторов тока, подвергаются аналоговой обработке, включающей предварительную фильтрацию с помощью частотных фильтров. Выходные сигналы указанных фильтров в результате аналого-цифрового преобразования представляются цифровыми отсчетами мгновенных значений токов фаз i_{na}, i_{nb}, i_{nc} , которые поступают на вход цифровой части (ЦЧ). В цифровой части содержатся реализуемые программным путем измерительные, логические и другие функциональные органы, элементы блокировки. Функциональная схема ЦЧ, обеспечивающая описанную выше организацию работы блокировки, приведена на рис. 1.

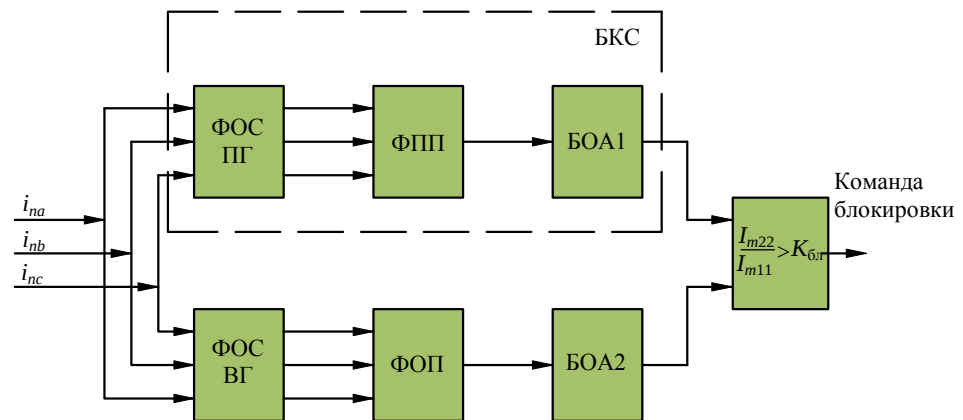


Рис. 1. Функциональная схема цифровой части блокировки

Fig. 1. Functional scheme of digital part of blocking

Содержащиеся в схеме формирователи ортогональных составляющих (ФОС) сигналов первой гармоники (ПГ) и второй гармоники (ФОС ВГ) выделяют из фазных токов гармоники с частотами соответственно 50 и 100 Гц, а также формируют их синусные и косинусные ортогональные составляющие (ОС) [4]. Фильтры прямой и обратной последовательностей (ФПП и ФОП) с использованием ОС сигналов соответствующих гармоник токов выделяют составляющие одноименных последовательностей, которые в итоге представляются их синусными и косинусными ОС [4].

В блоках определения амплитуд БОА1 и БОА2 по указанным ОС вычисляются амплитуды тока первой гармоники прямой последовательности I_{m11} и тока второй гармоники обратной последовательности I_{m22} . По указанным величинам находят параметр блокировки, который сравнивают с уставкой срабатывания $K_{бл}$.

В нормальных режимах, при перегрузках, самозапуске электродвигателей, а также при трехфазных КЗ, не сопровождающихся насыщением трансформаторов тока, на выходах ФОС ПГ содержатся соответствующие ОС первой гармоники фазных токов. В результате обработки указанных составляющих ФПП на его выходе формируется ОС прямой последовательности определенных величин, благодаря чему на выходе БОА1 фиксируется конечное значение I_{m11} . При этом вторая гармоника в фазных токах отсутствует, ортогональные составляющие на выходах ФОС ВГ равны нулю или имеют малые величины. Соответственно ОС обратной последовательности на выходе ФОП являются нулевыми или несущественными, вследствие чего обратная последовательность I_{m22} на выходе БОА2 равна нулю, либо имеет небольшое значение, называемое небалансом. В этом случае численное значение параметра $I_{m22}/I_{m11} < K_{бл}$ и команда блокировки не вырабатывается.

При несимметричных КЗ, не сопровождающихся насыщением трансформаторов тока, в фазных токах появляется составляющая обратной последовательности первой гармоники, которая не пропускается ФОС ВГ. Вследствие этого значение I_{m22} будет несущественным и действие защиты на отключение не блокируется.

В случае КЗ любых видов, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока, в фазных токах, кроме составляющей обратной последовательности первой гармоники, появляются составляющие обратной последовательности высших гармоник [5–10]. Однако на выходе ФОС ВГ присутствуют только ОС второй гармоники незначительной величины. При этом I_{m22} будет несущественным и команда блокировки не вырабатывается.

В режимах работы электроустановки, сопровождающихся БТН, независимо от степени насыщения трансформаторов тока в фазных токах появляются вторые гармоники значительной величины. В результате их выделения и обработки ФОС ВГ, ФОП, БОА2 численное значение I_{m22} существенно возрастает. При этом I_{m22}/I_{m11} становится больше уставки срабатывания $K_{бл}$, и вырабатывается команда блокировки защиты. По окончании переходного процесса I_{m22} снижается, и когда параметр I_{m22}/I_{m11} опускается ниже $K_{бл}$, блокировка снимается.

В цифровых устройствах защиты условие срабатывания блокировки (1) может быть реализовано, когда в качестве комбинированного тока используется наибольшая амплитуда первой гармоники полного тока I_{max} . Функциональная схема цифровой части такой блокировки отличается от приведенной на рис. 1 лишь тем, что блок формирования комбинированного сигнала БКС выполняется в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.

ФОС ПГ выполняет упомянутые ранее функции – выделяет из полных фазных токов первые гармоники с частотой 50 Гц, которые представляются на выходе их ОС. В БОА1 по ОС вычисляются амплитудные значения фазных величин и передаются на выход в виде отсчетов в дискретные моменты времени I_{ma} , I_{mb} , I_{mc} . В блоке формирования максимального значения БФМЗ определяется $I_{\max}$ с использованием одного из следующих подходов.

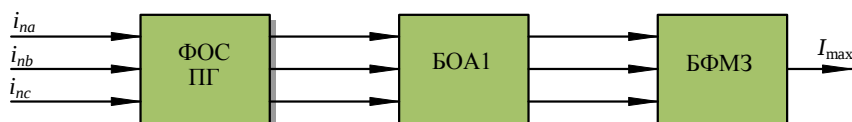


Рис. 2. Функциональная схема блока формирования комбинированного сигнала

Fig. 2. Functional scheme of unit of combined signal forming

Первый из них основан на выделении из трех амплитуд I_{ma} , I_{mb} , I_{mc} наибольшего значения

$$I_{\max} = \max \begin{cases} I_{ma}; \\ I_{mb}; \\ I_{mc}. \end{cases} \quad (2)$$

Достоинством такого подхода является возможность использования $I_{\max}$ также в качестве контролируемой величины в токовой защите при ее односистемном исполнении.

Второй подход предусматривает определение $I_{\max}$ как среднего значения трех амплитуд I_{ma} , I_{mb} , I_{mc}

$$I_{\max} = \frac{I_{ma} + I_{mb} + I_{mc}}{3}. \quad (3)$$

Поведение в различных режимах работы электроустановки блокировки данного исполнения существенно не отличается от ранее рассмотренного.

Следует отметить, что для приемлемой по точности оценки амплитуды той или иной гармоники требуется определенное время. Это означает, что рассмотренные варианты блокировок от БТН не формируют сигнал разрешения срабатывания защиты как минимум в течение одного периода промышленной частоты.

ВЫВОД

Предложены усовершенствованные принципы выполнения блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами при броске тока намагничивания. Сравнительная оценка их эффективности может быть произведена по результатам испытаний методом вычислительного эксперимента, а также с использованием осциллограмм броска тока намагничивания в указанных электроустановках, находящихся в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем. Релейная защита сетей / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники / Ф. Е. Евдокимов. М.: Высш. шк., 1971. С. 437–439.
3. Horowitz, S. H. Power System Relaying. Fourth Edition / S. H. Horowitz, A. G. Phadke, J. K. Niemira. Wiley, 2014. P. 400.
4. Шнейерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнейерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
5. Сопьяник, В. Х. Расчет и анализ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях устройств релейной защиты / В. Х. Сопьяник. Минск: БГУ, 2000. С. 108–118.
6. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей / Я. С. Гельфанд. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
7. Устройство для максимальной токовой защиты элементов энергетических систем с силовыми трансформаторами: пат. 16960 Респ. Беларусь, МПК Н 02Н 3/08, Н 02Н 3/20 / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Глинский, А. Г. Сапожникова; дата публ.: 30.04.2013.
8. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 798 с.
9. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: Технопринт, 2001. 133 с.
10. Романюк, Ф. А. Направления совершенствования токовых защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 2. С. 5–10.

Поступила 27.10.2016 Подписана в печать 28.12.2016 Опубликовано онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. Fedoseyev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Grids. Relay Protection of Electric Power Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
2. Yevdokimov F. E. (1971) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 437–439 (in Russian).
3. Horowitz S. H., Phadke A. G., Niemira J. K. (2014) *Power System Relaying*. Fourth Edition. Wiley. 400.
4. Shneyerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
5. Sopyanik W. H. (2000) *The Calculation and Analysis of Transient and Steady State Processes in the Transformers and Current Circuits of Relay Protection Devices*. Minsk, Belarusian State University, 108–118 (in Russian).
6. Gelfand Ya. S. (1987) *Relay Protection of Distribution Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 368 (in Russian).
7. Romanyuk F. A., Tishechkin A. A., Glinsky E. V., Sapozhnikova A. G. (2013) A Device for Overcurrent Protection Elements of Power Systems with Power Transformers. *Pat. Republic of Belarus No 16960* (in Russian).
8. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. (1998) *Relay Protection of Electric Energy Grids*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 798 (in Russian).
9. Romanyuk F. A. (2001) *Information Support of the Microprocessor Relay Protections of the Electrical Facilities*. Minsk, Tehnoprnt. 133 (in Russian).
10. Romaniuk F. A., Shevaldin M. A. (2015) Concepts of Improving Current Protection of Power-Grid Lines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obiedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (2), 5–10 (in Russian).

Received: 27 October 2016 Accepted: 28 December 2016 Published online: 7 March 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-108-117

УДК 621.311.22

Надежность и точность троированных измерений аналоговых технологических переменных

В. А. Анищенко¹⁾

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

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

Реферат. Увеличение единичных мощностей электрооборудования, усложнение технологических процессов, устройств контроля и управления ими на электрических станциях и подстанциях определяют необходимость повышения надежности и точности измерительной информации, характеризующей состояние управляемых объектов. Такая задача особенно важна для атомных электростанций, где цена недостоверности измерений ответственных технологических переменных особенно велика и может привести к непоправимым последствиям. Повышение надежности и точности измерений наряду с совершенствованием элементной базы обеспечивается методами оперативного контроля достоверности. Эти методы основаны на использовании избыточности информации (структурной, топологической, временной). В частности, информационная избыточность может быть достигнута за счет одновременного измерения одной аналоговой переменной двумя (дублирование) или тремя приборами (троирование, т. е. трехкратное резервирование). Проблема оперативного контроля трехкратно резервированных систем измерений электрических аналоговых переменных (токов, напряжений, активных и реактивных мощностей и энергий) рассматривается как частный случай обработки сигналов путем упорядоченного выбора на основе мажоритарного и близкого к нему преобразования. Трудности, возникающие при контроле достоверности измерений, связаны с решением двух задач. Во-первых, необходимо обосновать степень усечения распределений случайных погрешностей измерений и допустимых невязок парных разностей результатов измерений. Вторая задача состоит в формировании алгоритма совместной обработки совокупности отдельных измерений, определяемых как достоверные. Качество контроля характеризуется надежностью, синонимом которой принята достоверность, и точностью измерительной системы. Отдельно взятые, эти показатели могут привести к противоположным результатам. Поэтому предлагается компромиссное решение. Качество оценки измеряемого сигнала характеризуется единым комплексным показателем, учитывающим как надежностные, так и точностные свойства системы. Таким показателем является средняя точность, мерой которой служит средневзвешенная погрешность при различных возможных состояниях группы из трех приборов.

Ключевые слова: надежность и точность измерений, избыточность информации, среднеквадратичная погрешность, трехкратное резервирование

Для цитирования: Анищенко, В. А. Надежность и точность троированных измерений аналоговых технологических переменных / В. А. Анищенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 2. С. 108–117. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-108-117

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

The Reliability and Accuracy of the Triple Measurements of Analog Process Variables

V. A. Anishchenko¹⁾

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

Abstract. The increase in unit capacity of electric equipment as well as complication of technological processes, devices control and management of the latter in power plants and substations demonstrate the need to improve the reliability and accuracy of measurement information characterizing the state of the objects being managed. The mentioned objective is particularly important for nuclear power plants, where the price of inaccuracy of measurement responsible process variables is particularly high and the error might lead to irreparable consequences. Improving the reliability and accuracy of measurements along with the improvement of the element base is provided by methods of operational validation. These methods are based on the use of information redundancy (structural, topological, temporal). In particular, information redundancy can be achieved by the simultaneous measurement of one analog variable by two (duplication) or three devices (triplication i.e., triple redundancy). The problem of operational control of the triple redundant system of measurement of electrical analog variables (currents, voltages, active and reactive power and energy) is considered as a special case of signal processing by an orderly sampling on the basis of majority transformation and transformation being close to majority one. Difficulties in monitoring the reliability of measurements are associated with the two tasks. First, one needs to justify the degree of truncation of the distributions of random errors of measurements and allowable residuals of the pairwise differences of the measurement results. The second task consists in formation of the algorithm of joint processing of a set of separate measurements determined as valid. The quality of control is characterized by the reliability, which adopted the synonym of validity, and accuracy of the measuring system. Taken separately, these indicators might lead to opposite results. A compromise solution is therefore proposed. The quality of the evaluation of the measured signal is characterized by a single comprehensive measure that takes account of both reliability and accuracy properties of the system. This indicator is the average precision measure which is the weighted average error of the various possible states of a group of three devices.

Keywords: reliability and accuracy of measurements, redundancy of information, mean square error, triple redundancy

For citation: Anishchenko V. A. (2017) The Reliability and Accuracy of the Triple Measurements of Analog Process Variables. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 60 (2), 108–117. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-108-117 (in Russian)

Принципы обработки избыточных данных

Дублирование измерительных приборов позволяет с определенной вероятностью обнаруживать факты появления недостоверных измерений. Локализация отказавшего прибора при дублировании возможна лишь при наличии дополнительной избыточной информации. Но и в этом случае достоверность локализации низкая [1–4]. Гораздо бóльшие возможности для успешного контроля достоверности открываются при трехкратном резервировании, которое повышает надежность и точность оценки полезного сигнала x по результатам измерений тремя приборами x_1, x_2, x_3 :

$$x_1 = x + v_1 + n_1; x_2 = x + v_2 + n_2; x_3 = x + v_3 + n_3, \quad (1)$$

где v_1, v_2, v_3 – случайные погрешности измерений, соответствующие априорно известным классам точности приборов; n_1, n_2, n_3 – грубые погрешности измерений, выходящие за пределы классов точности приборов.

Под надежностью понимается соответствие результатов измерений классам точности приборов с учетом погрешностей каналов передачи информации. Синонимом понятия надежности может служить достоверность измерений.

Точность избыточных систем обусловлена выбранным алгоритмом совместной обработки совокупности достоверных результатов измерений. Способы использования структурной избыточности в информационно-измерительных системах подробно рассмотрены в [5]. Показано, что взятые в отдельности требования к надежности и точности могут приводить к противоречивым рекомендациям, когда алгоритмы, оптимальные по точности, характеризуются низкой надежностью, а способы резервирования, лучшие по надежности, приводят к некоторому проигрышу в точности. При поиске компромиссного решения во многих случаях основным является требование повышения надежности, поскольку при изменениях алгоритмов, определяющих точность, надежность характеристики могут изменяться по сравнению с точностными в более широких пределах.

Надежностные характеристики алгоритмов обработки избыточных данных основаны на выделении из общей совокупности результатов измерений тех из них, которые представляются достоверными. Остальные результаты полностью исключаются из рассмотрения.

При исследовании надежности информационно-измерительных систем исходными являются определения отказов приборов и алгоритмов преобразования результатов измерений и системы в целом. Отказ прибора рассматривается как событие, когда абсолютное значение погрешности измерения превышает принятое допустимое значение. Отказ системы в целом представляет событие, когда абсолютное значение ошибки оцениваемого выходного сигнала превосходит ее допустимое значение. Отказ системы может быть вызван как отказами приборов, так и ненадежностью алгоритма преобразования. Отказ алгоритма определяется как событие, когда его применение к совокупности показаний приборов приводит к выходу ошибки преобразования за допустимые пределы.

Условия надежности троированных измерений

Надежность и точность трехкратно резервированных систем как одна из задач обработки сигналов на основе упорядоченного выбора исследована в [5] с использованием известной априорной информации о вероятностных и точностных характеристиках измерительных приборов. Однако в процессе эксплуатации возможны непредвиденные грубые погрешности измерений, намного превышающие допустимые значения. Эти погрешности можно с определенной вероятностью выявлять путем анализа невязок парных разностей результатов измерений, которые представляют собой дополнительную избыточную апостериорную информацию, позволяющую повысить эффективность контроля достоверности.

Условия надежности, т. е. достоверностей измерений, имеют вид:

$$|\delta_{\text{факт}1,2}| \leq \delta_{\text{доп}1,2}; \quad |\delta_{\text{факт}2,3}| \leq \delta_{\text{доп}2,3}; \quad |\delta_{\text{факт}1,3}| \leq \delta_{\text{доп}1,3}, \quad (2)$$

где $\delta_{\text{факт}1,2}$, $\delta_{\text{факт}2,3}$, $\delta_{\text{факт}1,3}$ – фактические невязки парных разностей результатов измерений, определяемые как:

$$\delta_{\text{факт}1,2} = x_1 - x_2; \quad \delta_{\text{факт}2,3} = x_2 - x_3; \quad \delta_{\text{факт}1,3} = x_1 - x_3. \quad (3)$$

Полагая случайные погрешности измерений v_1 , v_2 , v_3 случайными независимыми событиями с нулевыми математическими ожиданиями, определяем допустимые невязки парных разностей измерений:

$$\delta_{\text{доп}1,2} = k_{1,2}\sigma_{1,2}; \quad \delta_{\text{доп}2,3} = k_{2,3}\sigma_{2,3}; \quad \delta_{\text{доп}1,3} = k_{1,3}\sigma_{1,3}, \quad (4)$$

где $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{2,3}$, $\sigma_{1,3}$ – среднеквадратичные погрешности парных разностей; $k_{1,2}$, $k_{2,3}$, $k_{1,3}$ – квантили, определяющие ширину $2k_{i,j}\sigma_{i,j}$ усеченных распределений парных разностей:

$$\begin{aligned} -k_{1,2}\sigma_{1,2} \leq x_1 - x_2 \leq k_{1,2}\sigma_{1,2}; \quad -k_{2,3}\sigma_{2,3} \leq x_2 - x_3 \leq k_{2,3}\sigma_{2,3}; \\ -k_{1,3}\sigma_{1,3} \leq x_1 - x_3 \leq k_{1,3}\sigma_{1,3}. \end{aligned} \quad (5)$$

Погрешности, лежащие вне пределов (5), относим к грубым погрешностям, которые не соответствуют классам точности приборов. Их вероятности могут намного превышать вероятности отбрасываемых «хвостов» усеченных распределений парных разностей.

Невыполнение хотя бы одного из условий достоверности (2) является признаком одного или нескольких результатов измерений с грубыми погрешностями. Рассмотрим их локализацию. В случае, если:

$$|\delta_{\text{факт}1,2}| > \delta_{\text{доп}1,2}; \quad |\delta_{\text{факт}2,3}| \leq \delta_{\text{доп}2,3}; \quad |\delta_{\text{факт}1,3}| \leq \delta_{\text{доп}1,3}, \quad (6)$$

логично предположить, что недостоверны результаты измерений x_1 и x_2 , поскольку оба они образуют недопустимо большую невязку.

Аналогично, если:

$$|\delta_{\text{факт}1,2}| \leq \delta_{\text{доп}1,2}; \quad |\delta_{\text{факт}2,3}| > \delta_{\text{доп}2,3}; \quad |\delta_{\text{факт}1,3}| \leq \delta_{\text{доп}1,3}, \quad (7)$$

то недостоверными будут измерения x_2 и x_3 , а в случае, когда:

$$|\delta_{\text{факт}1,2}| \leq \delta_{\text{доп}1,2}; \quad |\delta_{\text{факт}2,3}| \leq \delta_{\text{доп}2,3}; \quad |\delta_{\text{факт}1,3}| > \delta_{\text{доп}1,3}, \quad (8)$$

недостоверными считаем измерения x_1 и x_3 .

Если не соблюдаются два условия достоверности, например:

$$|\delta_{\text{факт}1,2}| > \delta_{\text{доп}1,2}; \quad |\delta_{\text{факт}2,3}| > \delta_{\text{доп}2,3}; \quad |\delta_{\text{факт}1,3}| \leq \delta_{\text{доп}1,3}, \quad (9)$$

то недостоверно измерение x_2 , так как оно входит в обе недопустимо большие невязки и не входит в допустимую невязку.

В случае, когда:

$$|\delta_{\text{факт}1,2}| > \delta_{\text{доп}1,2}; \quad |\delta_{\text{факт}2,3}| \leq \delta_{\text{доп}2,3}; \quad |\delta_{\text{факт}1,3}| > \delta_{\text{доп}1,3}, \quad (10)$$

то недостоверно измерение x_1 .

Если же:

$$|\delta_{\text{факт}1,2}| \leq \delta_{\text{доп}1,2}; \quad |\delta_{\text{факт}2,3}| > \delta_{\text{доп}2,3}; \quad |\delta_{\text{факт}1,3}| > \delta_{\text{доп}1,3}, \quad (11)$$

то недостоверным будет измерение x_3 .

Обоснование допустимых невязок парных разностей измерений

Надежность и точность оптимальной оценки полезного сигнала зависят от способа определения среднеквадратичных погрешностей парных разностей результатов измерений. Первый способ основан на использовании понятия смещенной оценки стандартного отклонения случайной величины x от ее математического ожидания $M(x)$ [6, 7]

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [x_i - M(x)]^2}, \quad (12)$$

где m – число одновременных измерений переменной.

Тогда среднеквадратичные погрешности парных разностей измерений в зависимости от среднеквадратичных погрешностей единичных измерений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ определяются как:

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}; \quad \sigma_{2,3} = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2}; \quad \sigma_{1,3} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}. \quad (13)$$

В случае равноточных измерений ($\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) получаем из (13) выражение для среднеквадратичной погрешности каждой парной разности ($\sigma_\Sigma = \sigma_{1,2} = \sigma_{2,3} = \sigma_{1,3}$)

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{2}\sigma. \quad (14)$$

Среднеквадратичная погрешность единичного измерения регламентирована в соответствии с классом точности прибора α (в относительных единицах) и максимальным значением измеряемой переменной A_{max} , на которую рассчитан прибор [8]:

$$\sigma = \frac{1}{k} \alpha A_{\text{max}}, \quad (15)$$

где квантиль k определяет ширину $2k\sigma$ усеченного распределения измеряемой переменной относительно ее математического ожидания

$$-k\sigma \leq x \leq k\sigma. \quad (16)$$

Распределение погрешности σ складывается из распределений как случайной, так и систематической погрешностей [9, 10].

Подстановка значений σ_Σ из (14) и σ из (15) в (4) дает окончательную формулу для допустимой невязки парной разности равноточных измерений ($k_\Sigma = k_{1,2} = k_{2,3} = k_{1,3}$; $\delta_{\text{доп}\Sigma} = \delta_{\text{доп}1,2} = \delta_{\text{доп}2,3} = \delta_{\text{доп}1,3}$)

$$\delta_{\text{доп}\Sigma} = \frac{k_\Sigma}{k} \sqrt{2} \alpha A_{\text{max}}. \quad (17)$$

Альтернативой рассмотренному обоснованию допустимой невязки парных разностей измерений является способ, основанный на использовании понятия несмещенной оценки стандартного отклонения случайной величины

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m [x_i - M(x)]^2}. \quad (18)$$

В этом случае среднеквадратичная погрешность парной разности равноточных измерений эквивалентна стандартному отклонению результатов двух измерений от истинного значения полезного сигнала [6, 7]

$$\sigma_\Sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}. \quad (19)$$

Допустимая невязка парной разности равноточных измерений в данном случае с учетом (16) и (19)

$$\delta_{\text{доп}\Sigma} = \frac{k_\Sigma}{k} \frac{\alpha A_{\text{max}}}{\sqrt{2}}. \quad (20)$$

Различие между смещенной (12) и несмещенной (18) оценками стандартного отклонения, незначительное при большом числе измерений, в случае трех измерений приводит к двукратному превышению допустимой невязки парных разностей при несмещенной оценке по сравнению с ее величиной при смещенной оценке. Субъективизм при определении допустимых невязок парных разностей обусловлен также неопределенностью, возникающей при выборе квантилей усечения распределений k и k_Σ . Верхняя оценка допустимой невязки (17) более консервативна. Ее целесообразно использовать в тех случаях, когда имеются обоснованные сомнения о независимости погрешностей измерений. Нижняя оценка (20) учитывает в большей степени взаимную компенсацию независимых погрешностей противоположных знаков.

Точность троированных измерений

Невыполнение хотя бы одного из условий достоверности (2) означает наличие грубых погрешностей одного или нескольких измерений, т. е. от-

каз соответствующих приборов. Для получения оптимальной оценки полезного сигнала следует учитывать только достоверные результаты измерений. Если выполняются все условия (2), достоверными считаются все измерения. Оптимальная оценка полезного сигнала при неравноточных измерениях представляет собой средневзвешенное среднее значение результатов измерений

$$x_{\text{опт}} = \left(\sum_{j=1}^3 \sigma_j^{-2} \right)^{-1} \sum_{i=1}^3 x_i \sigma_j^{-2}. \quad (21)$$

При равноточных измерениях получаем

$$x_{\text{опт}} = \frac{1}{3}(x_1 + x_2 + x_3). \quad (22)$$

Среднеквадратичная погрешность оптимальной оценки сигнала при неравноточных измерениях

$$\sigma_{\text{опт}} = \frac{\gamma_1 \gamma_2 \sigma_1}{\sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_1^2 \gamma_2^2}}, \quad \gamma_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}; \quad \gamma_2 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}. \quad (23)$$

Для равноточных измерений получаем

$$\sigma_{\text{опт}} = \frac{1}{3} \sigma. \quad (24)$$

В случае, когда недостоверны два результата измерений, оптимальной оценкой сигнала будет единственный достоверный результат измерения соответственно условиям локализации (6)–(8)

$$x_{\text{опт}} = x_3 \text{ (или } x_2, \text{ или } x_1). \quad (25)$$

Если недостоверно одно измерение, оптимальная оценка сигнала определяется медианой – полусуммой двух достоверных измерений. При неравноточных измерениях имеем в соответствии с условиями локализации (9)–(11):

$$x_{\text{опт}} = \frac{\sigma_3^2 x_1 + \sigma_1^2 x_3}{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}; \quad x_{\text{опт}} = \frac{\sigma_3^2 x_2 + \sigma_2^2 x_3}{\sigma_2^2 + \sigma_3^2}; \quad x_{\text{опт}} = \frac{\sigma_2^2 x_1 + \sigma_1^2 x_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (26)$$

при равноточных измерениях

$$x_{\text{опт}} = \frac{1}{2}(x_1 + x_2) = \frac{1}{2}(x_2 + x_3) = \frac{1}{2}(x_1 + x_3). \quad (27)$$

Среднеквадратичные погрешности сигнала при неравноточных измерениях:

$$\sigma_{\text{опт}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}; \quad \sigma_{\text{опт}} = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2}; \quad \sigma_{\text{опт}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (28)$$

при равноточных измерений, исходя из смещенной оценки (12), получаем

$$\sigma_{\text{опт}} = \sqrt{2}\sigma, \quad (29)$$

а если взять за основу несмещенную оценку (18), то

$$\sigma_{\text{опт}} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}. \quad (30)$$

Средняя точность троированных измерений

Для определения качества полезного сигнала недостаточно знать только его точность или только надежность. Может оказаться, что наиболее точная оценка обладает низкой надежностью, а наиболее надежная обладает низкой точностью. Возможные подходы при формализации показателей качества сигнала, учитывающие как точностные, так и надежностные свойства, исследованы в [5]. В рассматриваемой задаче троированных измерений примем единый комплексный показатель качества – среднюю точность, мерой которой является средневзвешенная погрешность $\sigma_{\text{ср}}$ условных погрешностей $\sigma_0, \sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ при различных возможных состояниях группы трех измерительных приборов

$$\sigma_{\text{ср}} = \sqrt{Q_0\sigma_0^2 + Q_I\sigma_I^2 + Q_{II}\sigma_{II}^2 + Q_{III}\sigma_{III}^2}, \quad (31)$$

где $Q_0, Q_I, Q_{II}, Q_{III}$ – весовые коэффициенты, равные вероятностям состояний группы приборов.

Вероятность состояния, когда исправны m приборов из трех, определяется формулой Бернулли [7]

$$Q_m = C_3^m q^m (1-q)^{3-m}, \quad (32)$$

где C_3^m – число сочетаний из трех приборов по m ; q – вероятность независимого отказа одного прибора.

Тогда вероятность состояния, когда все приборы исправны, определяется по формуле

$$Q_0 = (1-q)^3, \quad (33)$$

вероятность состояния, если отказали один, два или три прибора, – соответственно из уравнений:

$$Q_I = 3q(1-q)^2; \quad (34)$$

$$Q_{II} = 3q^2(1 - q); \quad (35)$$

$$Q_{III} = q^3. \quad (36)$$

Практически вероятности отказов приборов намного меньше вероятностей безотказной работы. Поэтому принимаем вероятность состояния $Q_{III} = 0$. Среднеквадратичная погрешность σ_0 определяется выражением (24). Среднеквадратичная погрешность σ_{II} эквивалентна среднеквадратичной погрешности единичного прибора. Среднеквадратичная погрешность σ_I определяется выражениями (29) и (30) соответственно смещенной и несмещенной оценками.

Результаты расчета средней точности измерительной системы с трехкратным резервированием представлены на рис. 1.

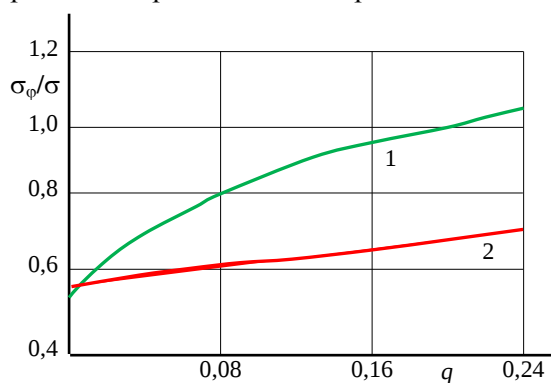


Рис. 1. Средневзвешенная погрешность системы относительно погрешности единичного прибора в зависимости от вероятности грубой погрешности измерения: 1 – смещенная; 2 – несмещенная оценки

Fig. 1. The average error of the system in relation to an error of a single device depending on the probability of gross error of measurement: 1 – biased; 2 – unbiased estimators

Трехкратное резервирование эффективно при консервативной смещенной оценке, если вероятность грубой погрешности измерения $q \leq 0,2$. При несмещенной оценке эффективность будет выше.

ВЫВОДЫ

1. Предложена и обоснована методика обнаружения и локализации отказавших измерительных приборов в системе трехкратного резервирования на основе сравнения парных разностей результатов измерений с их допустимыми невязками.
2. Получены формулы для определения оптимальной оценки и точности полезного сигнала измерительной системы трехкратного резервирования.
3. Произведена оценка эффективности системы трехкратного резервирования на основе комплексного показателя – средневзвешенной погрешности измерений при различных состояниях измерительных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анищенко, В. А. Надежность измерительной информации в системах электроснабжения / В. А. Анищенко. Минск: БГПА, 2000. 128 с.
2. Анищенко, В. А. Контроль достоверности дублированных измерений в условиях неопределенности / В. А. Анищенко. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 2. С. 11–18.
3. Анищенко, В. А. Достоверность дублированных измерений энергетических переменных / В. А. Анищенко, А. С. Немкович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 1. С. 5–16.
4. Анищенко, В. А. Обоснование понятия достоверности дублированных измерений / В. А. Анищенко, А. С. Немкович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 6. С. 12–19.
5. Гильбо, Е. П. Обработка сигналов на основе упорядоченного выбора / Е. П. Гильбо, И. Б. Челпанов. М.: Советское радио, 1975. 344 с.
6. Тейлор, Дж. Р. Введение в теорию ошибок / Дж. Р. Тейлор. М.: Мир, 1985. 272 с.
7. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. М.: Наука, 1969. 512 с.
8. Гамм, А. З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем / А. З. Гамм. М.: Наука, 1976. 220 с.
9. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений: ГОСТ 8.009–84. М.: Изд-во стандартов, 1985. 150 с.
10. Государственная система обеспечения единства измерений: метод. указания 1373–86. М.: Изд-во стандартов, 1986. 29 с.

Поступила 04.05.2016 Подписана в печать 03.08.2016 Опубликовано онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. Anishchenko V. A. (2000) *The Reliability of Measurement Data in Power Grids*. Minsk, Belarusian State Polytechnic Academy. 128 (in Russian).
2. Anisichenko V. A. (2010) Truth Control of Duplicate Measurements under Uncertainty Conditions. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (2), 11–18 (in Russian).
3. Anishchenko V. A., Nemkovich A. S. (2013) Reliability of Doubled Measurements of Power Variables. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (1), 5–16 (in Russian).
4. Anishchenko V. A., Nemkovich A. S. (2013) Concept Substantiation of Duplicate Measurement Accuracy. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (6), 12–19 (in Russian).
5. Gilbo Ye. P., Chelpanov I. B. (1975) *Signal Processing Based on Ordered Choice*. Moscow, Sovyetskoye Radio Publ., 344 (in Russian).
6. Taylor G. R. (1985) *Introduction to the Theory of Errors*. Moscow, Mir Publ. 272 (in Russian).
7. Smirnov N. V., Dunin-Barkovsky I. V. (1969) *Course of Probability Theory and Mathematical Statistics for Technical Applications*. Moscow, Nauka. 512 (in Russian).
8. Gamm A. Z. (1976) *Statistical Methods for State Estimation of Electric Power Grids*. Moscow, Nauka Publ. 220 (in Russian).
9. State Standard 8.009–84 (1985). The Regulation and Use of the Metrological Characteristics of Measuring Instruments. Moscow, Publishing House of Standards. 150 (in Russian).
10. Methodical Instructions 1373–86 (1986). State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Moscow, Publishing House of Standards. 29 (in Russian).

Received: 4 May 2016

Accepted: 3 August 2016

Published online: 7 March 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-118-132

УДК 621.311.4-742

Методы измерения влияний молнии путем имитации ее ударов с интервальной оценкой результатов измерений

П. В. Криксин¹⁾

¹⁾ООО «АЭСАТ Электрик» (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Представлены результаты разработки новых методов более точной интервальной оценки экспериментальных значений напряжений, возникающих при ударах молнии в молниеотводы, на заземляющих устройствах подстанций и в цепях контрольных кабелей, позволяющие повысить достоверность полученных данных молниевых помех на 28 %. Более точные значения интервальной оценки достигнуты за счет разработки модели измерений, учитывающей наряду с измеряемыми величинами различные погрешности измерений, и специальной обработки результатов измерений. В результате этого интервал нахождения истинного значения искомого напряжения определен с точностью 95 %. Методы могут быть использованы для измерительных комплексов ИК-1 и ИКП-1, состоящих из генератора апериодических импульсов, генератора высокочастотных импульсов и селективных вольтметров соответственно. Для оценки эффективности указанных методов выполнены серии экспериментальных оценок напряжения на заземляющих устройствах десяти действующих высоковольтных подстанций по разработанным и традиционным методам. Результаты оценок подтвердили возможность определения истинных значений напряжений в широком диапазоне, что необходимо учитывать в процессе технической диагностики молниезащиты подстанций при анализе результатов измерений и разработке мероприятий по снижению влияний молнии. Также сравнительный анализ результатов измерений по разработанным и традиционным методам показал, что истинное значение искомого напряжения может превышать измеренное на величину до 28 %, что необходимо учитывать при дальнейшем анализе параметров молниезащиты на объекте и разработке корректирующих мероприятий. Методы апробированы при обследовании электромагнитной обстановки на 27 действующих высоковольтных электрических подстанциях с открытым распределительным устройством 110 кВ. Применение методик позволило повысить точность собираемой информации, правильность оценки электромагнитной обстановки высоковольтных подстанций с ОРУ 110 кВ, эффективность адекватных разрабатываемых мероприятий по защите от влияний молнии.

Ключевые слова: имитационное моделирование, интервальная оценка, молния, молниезащита, подстанция

Для цитирования: Криксин, П. В. Методы измерения влияний молнии путем имитации ее ударов с интервальной оценкой результатов измерений / П. В. Криксин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 2. С. 118–132. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-118-132

Адрес для переписки

Криксин Павел Васильевич
ООО «АЭСАТ Электрик»
ул. Логойская, 19, комн. 9,
220053, Минский р-н, д. Валерьяново,
Республика Беларусь
Тел.: +375 29 606-22-21
kriksinpavel@gmail.com

Address for correspondence

Kriksin Pavel V.
The “AESAT Electric” Limited Liability Company
19 room 9, Logoiskaya str.,
220053, Minsk rayon, the village of Valeryanovo,
Republic of Belarus
Tel.: +375 29 606-22-21
kriksinpavel@gmail.com

Methods of Measuring the Effects of Lightning by Simulating its Strikes with the Interval Assessment of the Results of Measurements

P. V. Kriksin¹⁾

¹⁾The “AESAT Electric” Limited Liability Company” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of the development of new methods aimed at more accurate interval estimate of the experimental values of voltages on grounding devices of substations and circuits in the control cables, that occur when lightning strikes to lightning rods; the above-mentioned estimate made it possible to increase the accuracy of the results of the study of lightning noise by 28 %. A more accurate value of interval estimation were achieved by developing a measurement model that takes into account, along with the measured values, different measurement errors and includes the special processing of the measurement results. As a result, the interval of finding the true value of the sought voltage is determined with an accuracy of 95 %. The methods can be applied to the IK-1 and IKP-1 measurement complexes, consisting in the aperiodic pulse generator, the generator of high-frequency pulses and selective voltmeters, respectively. To evaluate the effectiveness of the developed methods series of experimental voltage assessments of grounding devices of ten active high-voltage substation have been fulfilled in accordance with the developed methods and traditional techniques. The evaluation results confirmed the possibility of finding the true values of voltage over a wide range, that ought to be considered in the process of technical diagnostics of lightning protection of substations when the analysis of the measurement results and the development of measures to reduce the effects of lightning are being fulfilled. Also, a comparative analysis of the results of measurements made in accordance with the developed methods and traditional techniques has demonstrated that the true value of the sought voltage may exceed the measured value at an average of 28 %, that ought to be considered in the further analysis of the parameters of lightning protection at the facility and in the development of corrective actions. The developed methods have been tested in surveys of the electromagnetic environment of 27 active high voltage electric substations with a 110 kV outdoor switchgear. The application of the techniques amended the accuracy of the information collected, the correctness of the evaluation of the electromagnetic environment of high-voltage substations with a 110 kV outdoor switchgear, the effectiveness of the developed adequate measures to protect against lightning effects.

Keywords: simulation, interval estimation, lightning, lightning protection, substation

For citation: Kriksin P. V. (2017) Methods of Measuring the Effects of Lightning by Simulating its Strikes with the Interval Assessment of the Results of Measurements. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 60 (2), 118–132. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-118-132 (in Russian)

Введение

Молния – одно из наиболее мощных и распространенных природных явлений, которые представляют опасность для низковольтных систем высоковольтных электрических подстанций. Оказываемые молнией влияния разнообразны и зависят от большого числа факторов: параметров тока молнии, грунтов, заземлителей, расстояний между объектами и др. К настоящему времени разработано достаточно аналитических методов [1–3], которые по определенным данным позволяют оценить величину и опасность влияний молнии. Вместе с тем очень часто погрешность таких оценок недопустимо велика, что главным образом связано с низкой достоверностью исходной информации. В действительности параметры удельного сопротивления

грунта, заземлителей и прочих элементов без выполнения измерений на конкретном объекте не могут быть определены с высокой точностью, поэтому весьма часто их оценка проводится только качественно.

Решение описанных трудностей возможно за счет применения методов имитационного моделирования, которые позволяют воспроизводить влияния молнии, близкие к реальным, но гораздо меньшей величины. Имитационное моделирование широко применяется на практике при выполнении работ по обследованию электромагнитной обстановки высоковольтных электрических подстанций [1, 2]. Способами имитационного моделирования можно также изучать влияния молнии. Вместе с тем предлагаемые в литературе методы имитационного моделирования не позволяют оценить неопределенность измеренной величины, т. е. возможный диапазон нахождения ее истинного значения. Решение указанной задачи приводится в настоящей статье. Способ нахождения неопределенности измеренной величины установлен для следующих влияний молнии: напряжения на заземляющем устройстве (ЗУ) и напряжения в кабелях вторичных цепей при имитации ударов молнии в молниеотводы высоковольтных электрических подстанций с открытым распределительным устройством (ОРУ) 110 кВ.

Методика № 1. Моделирование и расчет неопределенности измерений напряжений на заземляющем устройстве высоковольтной электрической подстанции при имитации ударов молнии в молниеотводы

Известно, что при ударе молнии в молниеотвод, заземлитель которого совмещен с заземлителем подстанции, ток распределяется по такому единому заземлителю и стекает в грунт. В связи с тем что заземлитель имеет сопротивление, напряжение на нем распределяется неравномерно. В результате между различными точками ЗУ возникает напряжение, которое может представлять опасность для контрольных кабелей, электрического и электронного оборудования. Существуют различные способы оценки величины напряжения, одним из которых является имитация ударов молнии в молниеотводы подстанции генератором апериодических импульсов (ГАИ), форма тока которого аналогична току молнии, но имеет гораздо меньшую величину, и измерение величины напряжения, обусловленного током генератора, вольтметром импульсным (ВИ), с приведением результатов измерений к реальной величине тока молнии.

Величина определяемого напряжения $U_{вл}$, приведенного к реальному току молнии, с учетом возможных погрешностей измерения описывается следующей формулой [5, 6]:

$$U_{вл} = \frac{(U_{изм} - U_{изм.ф})(1 + \delta U_{изм} + \delta U_{изм.г})}{I_{г}(1 + \delta I_{г})} I_{м}, \quad (1)$$

где $U_{изм}$ – измеренная величина напряжения при имитации удара молнии, В; $U_{изм.ф}$ – то же фоновое напряжение, В; $\delta U_{изм}$ – неопределенность, обу-

словленная погрешностью ВИ, о. е.; $\delta U_{\text{изм.т}}$ – то же, обусловленная температурной нестабильностью отношения измеренной величины напряжения к измеренной величине тока, о. е.; I_r – измеренная величина импульса тока ГАИ при имитации удара молнии, А; δI_r – неопределенность, обусловленная погрешностью ГАИ, о. е.; I_m – величина тока молнии, определяемая классом молниезащиты объекта, А.

Для имитации ударов молнии и измерения напряжений применяли приборы ГАИ и ВИ, входящие в состав измерительного комплекса ИК-1. Примеры имеют следующие метрологические характеристики:

- ГАИ: форма генерируемого импульса – апериодическая; длительность фронта генерируемых импульсов в режиме холостого хода по уровню 0,1–0,9 амплитуды – $(1,2 \pm 0,1)$ мкс; длительность генерируемых импульсов в режиме холостого хода по уровню 0,5 амплитуды – (50 ± 5) мкс; максимальная величина генерируемого импульса 20 А; предел допускаемого значения относительной погрешности измерения амплитуды импульсов тока – не более $\pm 10\%$;

- ВИ: диапазоны измерения амплитуды импульсов напряжения – от 0,5 до 5,0 В, от 5 до 50 В, от 50 до 200 В; предел допускаемого значения основной относительной погрешности измерения амплитуды импульсов напряжения – не более $\pm 10\%$; дополнительная температурная погрешность – не более $\pm 3\%$.

Схема измерений показана на рис. 1.

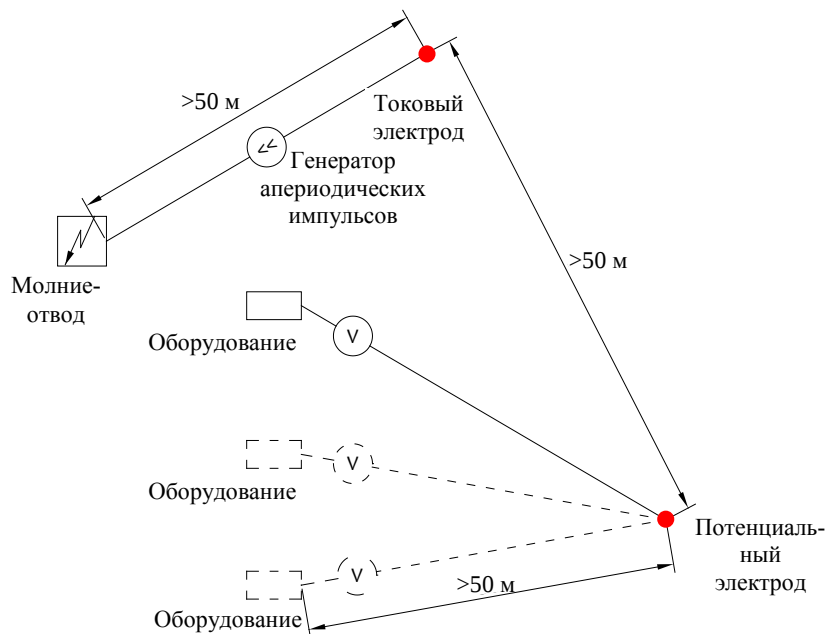


Рис. 1. Схема моделирования и измерения влияний молнии

Fig. 1. The circuit simulation and measurement of the effects of lightning

Стандартная процедура выполнения измерений имеет следующую последовательность [2]: одним выходом генератор подключается к заземляющему устройству молниеприемника, второй выход подключается к заземлителю на расстоянии не менее 50 м от молниеприемника; ВИ подключается между точками измерения напряжения (между двумя точками ЗУ, или между измеряемой точкой и удаленной землей, имитируемой заземлителем, расположенным на расстоянии не менее 50 м от измеряемой точки в направлении, противоположном точке заземления генератора); измеряется фоновое напряжение; включается генератор и имитируется ток молнии с параметрами волны 1,2/50 мкс; измеряется напряжение в исследуемых точках.

Измеренные по схеме на рис. 1 величины обрабатываются, на основании чего выполняется оценка неопределенности искомой величины напряжения $U_{\text{вл}}$. Для этих целей рассчитываются средняя величина и стандартная неопределенность измеренных фонового напряжения $U_{\text{изм.ф}}$, тока генератора I_{Γ} и напряжения на заземляющем устройстве $U_{\text{изм}}$ по следующим формулам:

$$U_{\text{изм.ф}} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} U_{\text{изм.ф}i}, \quad i=1, \dots, n_1; \quad (2)$$

$$u(\bar{U}_{\text{изм.ф}}) = \sqrt{\frac{1}{n_1(n_1-1)} \sum_{i=1}^{n_1} (U_{\text{изм.ф}i} - \bar{U}_{\text{изм.ф}})^2}, \quad i=1, \dots, n_1; \quad (3)$$

$$\bar{I}_{\Gamma} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} I_{\Gamma i}, \quad i=1, \dots, n_2; \quad (4)$$

$$u(\bar{I}_{\Gamma}) = \sqrt{\frac{1}{n_2(n_2-1)} \sum_{i=1}^{n_2} (I_{\Gamma i} - \bar{I}_{\Gamma})^2}, \quad i=1, \dots, n_2; \quad (5)$$

$$\bar{U}_{\text{изм}} = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} U_{\text{изм}i}, \quad i=1, \dots, n_3; \quad (6)$$

$$u(\bar{U}_{\text{изм}}) = \sqrt{\frac{1}{n_1(n_1-1)} \sum_{i=1}^{n_1} (U_{\text{изм}i} - \bar{U}_{\text{изм}})^2}, \quad i=1, \dots, n_1, \quad (7)$$

где n_1, n_2, n_3 – количество результатов измерений, шт.; $\bar{U}_{\text{изм.ф}}$ – среднее значение измеренного фонового напряжения, В; $u(\bar{U}_{\text{изм.ф}})$ – стандартная

неопределенность измерения фонового напряжения, В; $\bar{I}_Г$ – среднее значение измеренного тока генератора, А; $u(\bar{I}_Г)$ – стандартная неопределенность измерения тока генератора, А; $\bar{U}_{изм}$ – среднее значение измеренного напряжения, В; $u(\bar{U}_{изм})$ – стандартная неопределенность измерения напряжения, В.

Величины в формулах (2)–(7) имеют следующие свойства:

- фоновое напряжение $U_{изм.ф}$: тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{U}_{изм.ф}$; стандартная неопределенность – $u(\bar{U}_{изм.ф})$;

- измеренное напряжение $U_{изм}$: тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{U}_{изм}$; стандартная неопределенность – $u(\bar{U}_{изм})$;

- измеренный ток $I_Г$: тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{I}_Г$; стандартная неопределенность – $u(\bar{I}_Г)$;

- неопределенность измерения напряжения $\delta U_{изм}$: тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{U}_{изм} = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 10) \%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{U}_{изм}) = 0,1/\sqrt{3}$;

- неопределенность измерения тока $\delta I_Г$: тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{I}_Г = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 10) \%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{I}_Г) = 0,1/\sqrt{3}$;

- неопределенность из-за температурной нестабильности $\delta U_{изм.т}$: тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{U}_{изм.т} = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 3) \%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{U}_{изм.т}) = 0,03/\sqrt{3}$.

Показатели в (2)–(7) рассматриваются как некоррелированные.

За оценку измеряемой величины взято среднее арифметическое значение напряжения $\bar{U}_{вл}$

$$\bar{U}_{вл} = \frac{\bar{U}_{изм} - \bar{U}_{изм.ф}}{\bar{I}_Г} I_М. \quad (8)$$

Коэффициенты чувствительности для величин в (2)–(7) получим путем вычисления частных производных:

$$\begin{aligned}
c_1 &= \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial U_{\text{изм.ф}}} = -\frac{I_{\text{м}}}{\bar{I}_{\text{г}}}; \quad c_2 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial U_{\text{изм}}} = \frac{I_{\text{м}}}{\bar{I}_{\text{г}}}; \\
c_3 &= \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial (\delta U_{\text{изм}})} = \frac{\bar{U}_{\text{изм}} - \bar{U}_{\text{изм.ф}}}{\bar{I}_{\text{г}}} I_{\text{м}}; \quad c_4 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial (\delta U_{\text{изм.т}})} = \frac{\bar{U}_{\text{изм}} - \bar{U}_{\text{изм.ф}}}{\bar{I}_{\text{г}}} I_{\text{м}}; \\
c_5 &= \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial I_{\text{г}}} = \frac{\bar{U}_{\text{изм}} - \bar{U}_{\text{изм.ф}}}{\bar{I}_{\text{г}}} I_{\text{м}}; \quad c_6 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial (\delta I_{\text{г}})} = -\frac{\bar{U}_{\text{изм}} - \bar{U}_{\text{изм.ф}}}{\bar{I}_{\text{г}}} I_{\text{м}}.
\end{aligned}$$

Исходя из этого вклады в неопределенность составят:

$$\begin{aligned}
u_1(U_{\text{вл}}) &= c_1 u(\bar{U}_{\text{изм.ф}}); \quad u_2(U_{\text{вл}}) = c_2 u(\bar{U}_{\text{изм}}); \\
u_3(U_{\text{вл}}) &= c_3 u(U_{\text{изм}}); \quad u_4(U_{\text{вл}}) = c_4 u(U_{\text{изм.т}}); \\
u_5(U_{\text{вл}}) &= c_5 u(\bar{I}_{\text{г}}); \quad u_6(U_{\text{вл}}) = c_6 u(\delta I_{\text{г}}).
\end{aligned}$$

Суммарная стандартная неопределенность при измерении $U_{\text{вл}}$

$$u_c(U_{\text{вл}}) = \sqrt{u_1^2(U_{\text{вл}}) + u_2^2(U_{\text{вл}}) + u_3^2(U_{\text{вл}}) + u_4^2(U_{\text{вл}}) + u_5^2(U_{\text{вл}}) + u_6^2(U_{\text{вл}})}. \quad (9)$$

Расширенную неопределенность измерения $U_{\text{вл}}$ определим для уровня доверия $p = 95 \%$ при коэффициенте охвата $k = 2,0$ о. е.

$$D_{U_{\text{вл}}} = k u_c(U_{\text{вл}}).$$

Конечный результат измерения будет иметь следующий вид:

$$U_{\text{вл}} = U_{\text{вл}} \pm D_{U_{\text{вл}}} \quad (k = 2,0; \quad p = 95 \%).$$

Пример измерений и расчетов распределения напряжений по ЗУ при ударе молнии в молниеотвод для подстанции приведен на рис. 2.

Выполнены имитация ударов молнии в молниеотвод МО1 и измерения напряжений на ЗУ относительно молниеотвода МО1 и оперативного пункта управления (ОПУ). Полученные результаты измерений и расчетов показаны на рис. 3.

Результаты измерений фоновое напряжения $U_{\text{фмi}}$, тока генератора $I_{\text{гi}}$, напряжения на ЗУ $U_{\text{мi}}$ для одной серии имитаций ударов молнии приведены в табл. 1.

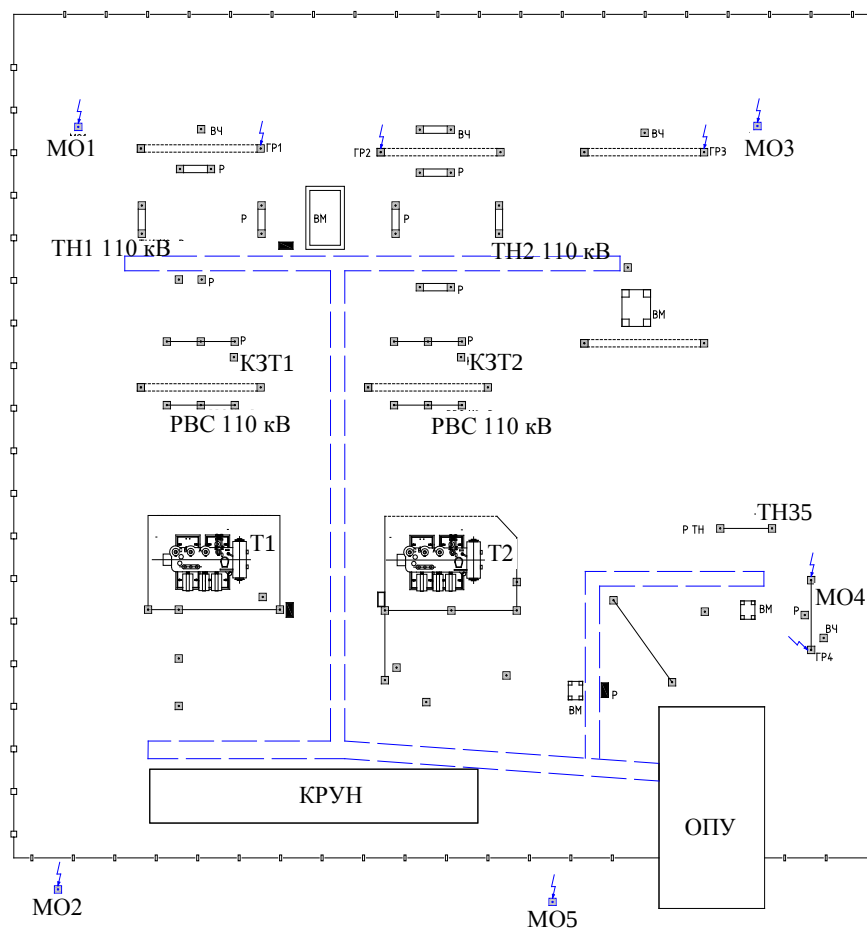


Рис. 2. План подстанции

Fig. 2. Substation plan

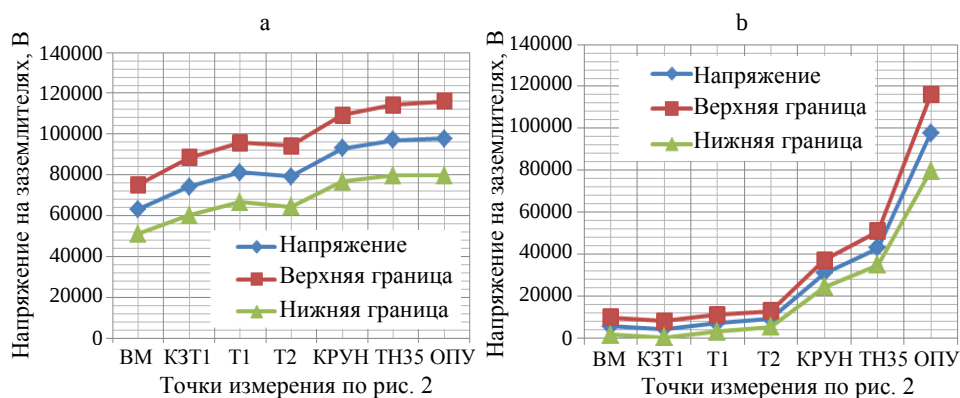


Рис. 3. Результаты измерений и расчетов напряжений на заземляющем устройстве при имитации ударов молнии в молниеотвод MO1 относительно:
а – MO1; б – оперативного пункта управления

Fig. 3. The results of measurements and calculations of voltage on a grounding device while a lightning strike on a lightning rod MO1 with regard to: a – MO1; b – an operational control

Таблица 1

Результаты измерений
The results of the measurements

Точка имитации удара молнии	$U_{\text{фм}}, \text{ В}$	Длительность фронта импульса, мкс	$I_{\text{Г}}, \text{ А}$	$U_{\text{м}}, \text{ А}$
МО1	0,24	1,2	5,6	5,8
	0,15		5,8	5,9
	0,11		5,1	5,3
	0,18		5,4	4,9
	0,09		5,3	5,5

Результаты расчетов параметров бюджета неопределенности показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов параметров бюджета неопределенности
The results of calculations of the parameters of the uncertainty budget

Величина x_i	Значение оценки x_i	Интервал $\pm r$	Тип неопределенности	Распределение вероятностей	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад неопределенности $u_i(y)$, В
$U_{\text{м}}, \text{ В}$	5,48	—	А	Нормальное	0,180	18382	3309
$U_{\text{фм}}, \text{ В}$	0,15	—	А	Нормальное	0,027	–18382	–488
$\delta U_{\text{м}}, \text{ о. е.}$	0,00	0,10	В	Равномерное	0,058	97904	5653
$\delta U_{\text{мт}}, \text{ о. е.}$	0,00	0,03	В	Равномерное	0,017	97904	1696
$I_{\text{Г}}, \text{ А}$	5,44	—	А	Нормальное	0,121	–17997	–2175
$\delta I_{\text{Г}}, \text{ о. е.}$	0,00	0,10	В	Равномерное	0,058	–97904	–5653
$U_{\text{вл}}, \text{ В}$	97904	—	—	—	—	—	9094

Итог выражается как результат измерений плюс-минус расширенная неопределенность

$$97904 \pm 18187 \text{ В.}$$

Аналогичным образом разработана методика выполнения измерений напряжений, возникающих в кабелях вторичных цепей при ударах молнии в молниеотводы подстанции.

Методика № 2. Моделирование и расчет неопределенности измерений напряжений в кабелях вторичных цепей высоковольтной электрической подстанции при имитации ударов молнии в молниеотводы

Известно, что при протекании тока молнии по проводникам вокруг них возникает высокая напряженность электромагнитного поля, которая посредством электромагнитной индукции наводит токи и напряжения в проводящих элементах, в том числе в кабелях вторичных цепей [7, 8]. В том случае, если кабели вторичных цепей подключены к электронным техническим средствам, возникающие в цепях помехи оказываются приложен-

ными к их портам. Результатами действия помех являются сбои в работе или повреждения электронных технических средств [9, 10].

Величина напряжений, наводимых в кабелях вторичных цепей, может быть определена методами имитационного моделирования путем имитации удара молнии в молниеотвод генератором высокочастотных импульсов (ГВЧИ) и измерения наводимых в проводниках напряжений посредством вольтметра (ВИ-6М). Необходимые для моделирования генератор и вольтметр входят в состав измерительного комплекса ИК-1 и имеют следующие метрологические характеристики:

- ГВЧИ: форма генерируемого тока – затухающие колебания с частотой генерируемого импульса $(0,50 \pm 0,05)$ МГц, $(1,0 \pm 0,1)$ МГц, $(2,0 \pm 0,2)$ МГц, с частотой следования генерируемого импульса (10 ± 2) Гц; верхний предел измерения 10 А на частоте 0,5 МГц, 8 А – на частоте 1 МГц, 5 А – на частоте 2 МГц; значение относительной погрешности измерения амплитуды генерируемого тока – не более $\pm 10\%$;

- ВИ-6М: диапазоны измерения амплитуды импульсов напряжения – до 5 В, от 5 до 50 В, от 50 до 200 В; предел допускаемого значения основной относительной погрешности измерения амплитуды импульсов напряжения – не более $\pm 10\%$.

Величина определяемого наведенного напряжения $U_{\text{ин.вл}}$, приведенного к реальному току молнии, с учетом возможных погрешностей измерения описывается следующей формулой:

$$U_{\text{ин.вл}} = \frac{(U_{\text{к}} - U_{\text{фк}})(1 + \delta U_n)}{I_{\text{г}}(1 + \delta I_{\text{г}})} I_{\text{м}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{к}}$, $U_{\text{фк}}$ – амплитуды измеренного в кабеле напряжения при включенном и выключенном генераторе соответственно, В; δU_n – погрешность измерения ВИ-6М, о. е.; $I_{\text{г}}$ – амплитуда генерируемого ГВЧИ тока, А; $\delta I_{\text{г}}$ – погрешность измерения ГВЧИ, о. е.

Имитация ударов молнии выполняется для существующих молниеприемников и кабелей вторичных цепей. Для измерения выбираются кабельные трассы, расположенные наиболее близко и на наибольшем протяжении по отношению к молниеотводам. В каждой трассе выбирают типовые виды кабелей: с экраном, без экрана, с наименьшим и наибольшим числом жил. Кабели подбирают таким образом, чтобы в них имелись свободные или рабочие жилы с нагрузкой на удаленном от молниеотвода конце не менее 1 кОм (разомкнутый контакт). Стандартная процедура выполнения измерений имеет следующую последовательность: ВИ-6М подключают одним выходом к измеряемой жиле, а вторым – к корпусу устройства, к которому подходит жила кабеля; выполняют измерение фоновых напряжений; ГВЧИ одним концом подключают к заземлителю молниеприемника, а вторым – к его конструкции так, чтобы путь протекания тока проходил вдоль кабеля, на котором выполняются измерения помех; включают ГВЧИ и имитируют протекание тока молнии на различных частотах;

измеряют значение тока, генерируемого ГВЧИ, и величину напряжения в измеряемых цепях.

Измеренные величины обрабатываются, и выполняется оценка неопределенности искомой величины напряжения $U_{\text{ин.вл.}}$. Для этого рассчитываются средняя величина и стандартная неопределенность измеренных фоновое напряжения $U_{\text{фк}}$, тока генератора $I_{\text{г}}$ и напряжения $U_{\text{к}}$ по следующим формулам:

$$\bar{U}_{\text{фк}} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} U_{\text{фк}i}, \quad i=1, \dots, n_1; \quad (11)$$

$$u(\bar{U}_{\text{фк}}) = \sqrt{\frac{1}{n_1(n_1-1)} \sum_{i=1}^{n_1} (U_{\text{фк}i} - \bar{U}_{\text{фк}})^2}, \quad i=1, \dots, n_1; \quad (12)$$

$$\bar{I}_{\text{г}} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} I_{\text{г}i}, \quad i=1, \dots, n_2; \quad (13)$$

$$u(\bar{I}_{\text{г}}) = \sqrt{\frac{1}{n_2(n_2-1)} \sum_{i=1}^{n_2} (I_{\text{г}i} - \bar{I}_{\text{г}})^2}, \quad i=1, \dots, n_2; \quad (14)$$

$$\bar{U}_{\text{к}} = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} U_{\text{к}i}, \quad i=1, \dots, n_3; \quad (15)$$

$$u(\bar{U}_{\text{к}}) = \sqrt{\frac{1}{n_3(n_3-1)} \sum_{i=1}^{n_3} (U_{\text{к}i} - \bar{U}_{\text{к}})^2}, \quad i=1, \dots, n_3, \quad (16)$$

где n_1, n_2, n_3 – количество результатов измерений, шт.; $\bar{U}_{\text{фк}}$ – среднее значение измеренного фоновое напряжения, В; $u(\bar{U}_{\text{фк}})$ – стандартная неопределенность измерения фоновое напряжения, В; $\bar{I}_{\text{г}}$ – среднее значение измеренного тока генератора, А; $u(\bar{I}_{\text{г}})$ – стандартная неопределенность измерения тока генератора, А; $\bar{U}_{\text{к}}$ – среднее значение измеренного напряжения, В; $u(\bar{U}_{\text{к}})$ – стандартная неопределенность измерения напряжения, В.

Величины в формулах (11)–(16) имеют следующие свойства:

- фоновое напряжение $U_{\text{фк}}$: тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{U}_{\text{фк}}$; стандартная неопределенность – $u(\bar{U}_{\text{фк}})$;

• измеренное напряжение U_k : тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{U}_k$; стандартная неопределенность – $u(\bar{U}_k)$;

• измеренный ток I_r : тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{I}_r$; стандартная неопределенность – $u(\bar{I}_r)$;

• неопределенность измерения напряжения δU_k : тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{U}_k = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 10)\%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{U}_k) = 0,1/\sqrt{3}$;

• неопределенность измерения тока δI_r : тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{I}_r = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 10)\%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{I}_r) = 0,1/\sqrt{3}$.

Исследуемые параметры рассматриваются как некоррелированные. За оценку измеряемой величины берется среднее арифметическое значение напряжения

$$\bar{U}_{ин.вл} = \frac{\bar{U}_k - \bar{U}_{фк}}{\bar{I}_r} I_m. \quad (17)$$

Коэффициенты чувствительности для величин в (11)–(16) получим путем вычисления частных производных:

$$c_1 = \frac{\partial U_{ин.вл}}{\partial U_{фк}} = -\frac{I_m}{\bar{I}_r}; \quad c_2 = \frac{\partial U_{ин.вл}}{\partial U_k} = \frac{I_m}{\bar{I}_r}; \quad c_3 = \frac{\partial U_{ин.вл}}{\partial (\delta U_n)} = \frac{\bar{U}_k - \bar{U}_{фк}}{\bar{I}_r} I_m;$$

$$c_4 = \frac{\partial U_{ин.вл}}{\partial I_r} = \frac{\bar{U}_k - \bar{U}_{фк}}{\bar{I}_r} I_m; \quad c_5 = \frac{\partial U_{ин.вл}}{\partial (\delta I_r)} = -\frac{\bar{U}_k - \bar{U}_{фк}}{\bar{I}_r} I_m.$$

Исходя из этого вклады в неопределенность составят:

$$u_1(U_{ин.вл}) = c_1 u(\bar{U}_{фк}); \quad u_2(U_{ин.вл}) = c_2 u(\bar{U}_k); \quad u_3(U_{ин.вл}) = c_3 u(U_n);$$

$$u_4(U_{вл}) = c_4 u(\bar{I}_r); \quad u_5(U_{вл}) = c_5 u(\delta I_r).$$

Суммарная стандартная неопределенность при измерении $U_{ин.вл}$

$$u_c(U_{ин.вл}) = \sqrt{u_1^2(U_{ин.вл}) + u_2^2(U_{ин.вл}) + u_3^2(U_{ин.вл}) + u_4^2(U_{ин.вл}) + u_5^2(U_{ин.вл})}. \quad (18)$$

Расширенную неопределенность измерения $U_{ин.вл}$ определим для уровня доверия $p = 95\%$ при коэффициенте охвата $k = 2,0$ о. е.

$$D_{U_{ин.вл}} = k u_c (U_{ин.вл}).$$

Конечный результат измерения будет иметь следующий вид:

$$U_{ин.вл} = U_{ин.вл} \pm D_{U_{ин.вл}} \quad (k = 2,0; \quad p = 95 \%).$$

Пример измерений и расчетов напряжений в цепях вторичных кабелей при имитации ударов молнии в молниеотвод с оценкой неопределенности их находжений для подстанции приведен на рис. 2. Имитация ударов молнии проведена для всех молниеотводов подстанции (МО1–МО5). Измерения напряжений выполнены в цепи кабеля, проложенного от ВМ 110 кВ до ОПУ. Для пересчета напряжений приняты следующие параметры молнии: первый импульс 100,0 кА частотой 1,0 МГц, последующий импульс 25,0 кА частотой 2,0 МГц.

Полученные результаты измерений и расчетов показаны на рис. 4.

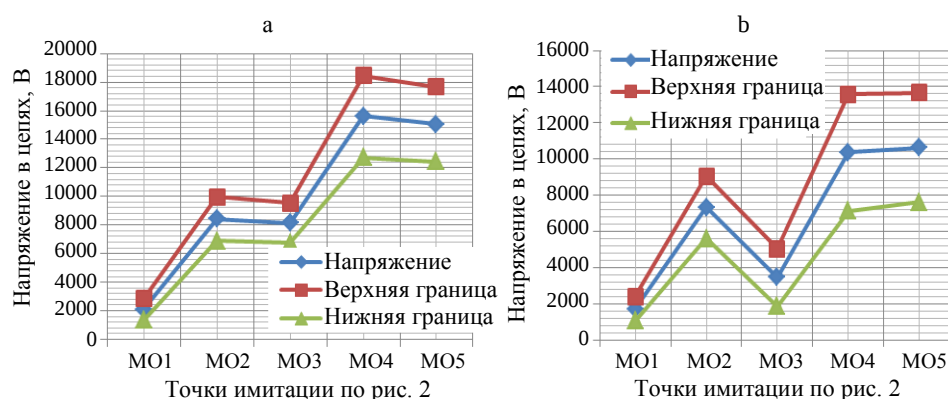


Рис. 4. Результаты измерений и расчетов напряжений в цепях при имитации ударов молнии в молниеотводы: а – первый удар молнии; б – последующий удар молнии

Fig. 4. The results of measurements and calculations of voltages in the circuit caused by simulating lightning strikes on lightning rods: а – first lightning strike; б – subsequent lightning strike

Результаты измерений фоновое напряжение $U_{фпi}$, тока генератора $I_{Гi}$, напряжения в цепях $U_{пi}$ для одной серии имитаций ударов молнии приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений
The results of the measurements

Кабель	Точка имитации ударов молнии	$U_{фпi}$, В	f , МГц	$I_{Гi}$, А	$U_{пi}$, В	$I_{Мi}$, А
Цепи в ОПУ	МО1	0,35	1	6,6	0,47	100000
		0,30		6,3	0,39	
		0,31		6,2	0,49	
		0,29		6,1	0,42	
		0,31		6,3	0,45	

Результаты расчетов параметров бюджета неопределенности показаны в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов параметров бюджета неопределенности
The results of calculations of the parameters of the uncertainty budget

Величина x_i	Значение оценки x_i	Интервал $\pm r$	Тип неопределенности	Распределение вероятностей	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад неопределенности $u_i(y)$, В
$U_{п}$, В	0,44	–	A	Нормальное	0,018	15873	282,16
$U_{фп}$, В	0,31	–	A	Нормальное	0,010	–15873	–161,87
$\delta U_{п}$, о. е.	0,00	0,10	B	Равномерное	0,058	2095,2	121,0
I_T , А	6,30	–	A	Нормальное	0,084	–333	–27,8
δI_T , о. е.	0,00	0,10	B	Равномерное	0,058	–2095	–121,0
Определяемое значение $U_{мн}$, В	2095	–	–	–	–	–	369

Итог выражается как результат измерений плюс-минус расширенная неопределенность: 2095 ± 737 В.

ВЫВОДЫ

1. Получаемые по предложенной методике более точные экспериментальные результаты позволяют повысить достоверность оценок электромагнитных влияний молнии и улучшить качество разрабатываемых корректирующих мероприятий.

2. Результаты исследований рекомендуются к применению в следующей практической деятельности: предпроектные обследования подстанций для сбора информации о текущем состоянии молниезащиты, приемосдаточные испытания молниезащиты и при ее периодической инспекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базелян, Э. М. Физика молнии и молниезащиты / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзен. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
2. Rakov, V. A. Lightning. Physics and Effects / V. A. Rakov, M. A. Uman. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 687 p.
3. Петров, С. Р. Компьютерные программы для анализа и проектирования устройств заземления и молниезащиты / С. Р. Петров, Р. К. Борисов // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: сб. докл. Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2002. – С. 41–43.
4. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства: Стандарт организации СТО 56947007-29.240.044–2010. Введ. 21.04.2010. М.: ОАО «Федеральная сетевая компания единой энергетической системы», 2010. 147 с.
5. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях: Стандарт организации СО 34.35.311–2004 / Российское открытое акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России». М.: Изд-во МЭИ, 2004. 78 с.

6. Кострикин, А. М. Проблемы электромагнитной совместимости на объектах электро-энергетики и пути их решения / А. М. Кострикин, П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. 2010. № 3. С. 44–45.
7. Криксин, П. В. Моделирование и анализ процессов, происходящих при стекании тока молнии в грунт / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // Энергия и Менеджмент. 2012. № 2. С. 14–19.
8. Криксин, П. В. Обследование электромагнитной обстановки на электрических подстанциях. Теория и практика / П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. 2011. № 3. С. 25–35.
9. Криксин, П. В. Вторичные влияния молнии. Как она поражает электронику предприятий / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // Энергия и Менеджмент. 2014. № 1. С. 34–40.
10. Фурсанов, М. И. Криксин П. В. Моделирование и анализ токов в заземляющих устройствах электроустановок / М. И. Фурсанов, П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. 2010. № 3. С. 16–21.

Поступила 30.05.2016 Подписана в печать 03.08.2016 Опубликовано онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. Bazylyan E. M., Raizen Yu. P. (2001) *Physics of Lightning and Lightning Protection*. Moscow, Fizmatlit Publ. 320 (in Russian).
2. Rakov V. A., Uman M. A. (2003) *Lightning. Physics and Effects*. Cambridge, Cambridge University Press. 687. DOI: 10.1017/CBO9781107340886.
3. Petrov S. R., Borisov R. K. (2002) Computer Programs for Analysis and Design of Grounding and Lightning Protection. *Pervaya Rossiyskaya Konferentsiya po Zazemlaiushchim Ustroistvam: Sb. Dokl.* [First Russian Conference on Grounding Devices. Collected Presentations]. Novosibirsk, Siberian Energy Academy, 41–43 (in Russian).
4. Open Joint Stock Company “Federal Grid Company of Unified Energy System”. Standard of the Organization 56947007-29.240.044–2010 (2010). Methodic Instructions for Ensuring Electromagnetic Compatibility at Electric Grid Facilities. Moscow. 147 (in Russian).
5. Standard of Organizatiuon “Russian Joint Stock Company of Power and Electrification of Russia” 34.35.311–2004 (2004) Methodical Instructions for Dtermining of the Electromagnetic Environment and Compatibility in Power Stations and Substation. Moscow, Publishing House of the Moscow Power Engineering Institute. 78 (in Russian).
6. Kostrikin A. M., Kriksin P. V. (2010) Problems of Electromagnetic Compatibility at Electric Power Facilities and Ways to Solve them. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (3), 44–45 (in Russian).
7. Kriksin P. V., Fursanov M. I. (2012) Modeling and Analysis of the Processes Occurring in the Drainage of the Lightning Current into the Ground. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (2), 14–19 (in Russian).
8. Kriksin P. V. (2011). The Survey of Electromagnetic Environment at Electric Substations. Theory and Practice. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (3), 25–35 (in Russian).
9. Kriksin P. V., Fursanov M. I. (2014) Secondary Effects of Lightning. How it Affects Electronic Devices of Eneterprises. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (1), 34–40 (in Russian).
10. Fursanov M. I., Kriksin P. V. (2010) Modeling and Analysis of Currents in the Grounding Devices of Electric Installations. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (3), 16–21 (in Russian).

Received: 30 May 2016

Accepted: 3 August 2016

Published online: 7 March 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-133-146

УДК 621.313

Расчет индуктивностей синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами

Фыонг Ле Нго¹⁾

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

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

Реферат. Синхронный двигатель с инкорпорированными постоянными магнитами (СДИПМ) относится к явнополюсному, характеризующимся неравенством индуктивностей по продольным (d) и поперечным (q) осям. Электромагнитный момент СДИПМ состоит из двух составляющих: активной и реактивной, которая зависит от продольной и поперечной индуктивностей. Представлен аналитический метод расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции трехфазного СДИПМ. Распределенные обмотки статора замещены эквивалентными синусными обмотками. Ротор с инкорпорированными постоянными магнитами замещен эквивалентным явнополюсным ротором. Участки магнитной цепи, содержащей постоянные магниты, воздушные барьеры и стальные мосты, замещены эквивалентным воздушным зазором. Получены выражения магнитной индукции, создаваемой током обмоток статора в каждой точке воздушного зазора, а также потокосцеплений обмоток статора. Уравнения собственных индуктивностей фаз A , B , C и индуктивностей взаимной индукции определены из потокосцеплений. Индуктивности осей d и q получены в результате преобразования осей $abc-dq$. Результаты разработанного аналитического метода и метода конечных элементов представлены в виде графика. Осуществлено сравнение расчетов, полученных этими двумя методами.

Ключевые слова: синхронный двигатель с инкорпорированными магнитами, эквивалентная синусная обмотка, эквивалентный явнополюсный ротор, индуктивность

Для цитирования: Нго, Фыонг Ле. Расчет индуктивностей синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами / Фыонг Ле Нго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 2. С. 133–146. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-133-146

Calculation of Inductance of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Phyong Le Ngo¹⁾

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

Abstract. Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) refers to salient-pole synchronous motors, characterized by inequality of inductances of longitudinal (d) and transverse (q) axes.

Адрес для переписки

Нго Фыонг Ле
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
ngo.phuong.le@gmail.com

Address for correspondence

Ngo Phuong Le
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-61
ngo.phuong.le@gmail.com

Electromagnetic torque of IPMSM consists of two components: active torque and reactive torque; the latter depends on inductances of d and q axes. An analytical method to calculate own inductances and mutual inductances of a three-phase IPMSM is presented. Distributed windings of the stator are substituted by equivalent sine distributed windings. An interior permanent magnets rotor is substituted by an equivalent salient-pole rotor. Sections of a magnetic circuit comprising interior permanent magnets, air barriers and steel bridges are substituted by equivalent air-gap. The expressions of the magnetic induction created by current of the stator windings at each point of the air gap as well as of magnetic flux linkage of the stator windings have been obtained. The equations of the self-inductances of phases A, B, C, and of inductance of mutual induction are determined from magnetic flux linkage. The inductance of the d and q axes have been obtained as a result of transformation of the axes $abc-dq$. The results obtained with the use of the proposed analytical method and the finite element method are presented in the form of a graph; the calculations that have been obtained by these two methods were compared.

Key words: permanent magnet synchronous motor, equivalent sinusoidal windings, equivalent salient rotor, inductance

For citation: Ngo Phuong Le (2017) Calculation of Inductance of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (2), 133–146. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-133-146 (in Russian)

Введение

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) обладают рядом преимуществ, таких как: отсутствие обмотки возбуждения на роторе, что обеспечивает уменьшение электрических потерь, повышение КПД и улучшение условий охлаждения двигателя; высокое отношение максимального допустимого момента к моменту инерции двигателя – что предпочтительно для применения в быстродействующем электроприводе; лучшие массогабаритные показатели, что характеризуется высоким отношением номинальной мощности к массе двигателя. В системах электропривода используются различные виды СДПМ, отличающиеся конструктивным исполнением ротора. Все многообразие можно объединить двумя особенностями: с расположением постоянных магнитов (ПМ) на поверхности ротора – поверхностные (СДППМ) и с внутренним расположением ПМ в роторе – инкорпорированные (СДИПМ).

В отличие от СДППМ, которые имеют одинаковые значения индуктивностей в продольной (d) и поперечной (q) осях, СДИПМ обладают различными продольными и поперечными индуктивностями, что приводит к возникновению реактивной составляющей электромагнитного момента. Реактивный момент позволяет СДИПМ регулировать его скорость выше номинальной, что важно для применения в тяговом электроприводе при регулировании скорости в режиме постоянной мощности. Для определения реактивного момента СДИПМ необходимо вычислить продольную и поперечную индуктивности.

В последнее время для расчета индуктивностей СДИПМ с высокой точностью применяется метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый на компьютере [1, 2]. Однако МКЭ требует больших вычислительных затрат. Аналитический расчет целесообразно применять в предварительных расчетах. Разработан аналитический метод расчета индуктивностей СДИПМ, в котором распределенные обмотки статора заменяются синусными, а в роторе участки магнитной цепи, содержащей постоянные магниты, воздушные барьеры и стальные мосты, замещены эквивалентным воздушным зазором.

Эквивалентная синусная обмотка

Рассмотрим обмотку одной фазы СДИПМ. Она представляет собой распределенную обмотку, содержащую p групп катушек, соединенных последовательно. Каждая группа катушек содержит q катушек, соединенных последовательно. Ротор с инкорпорированными магнитами имеет p пар полюсов. Схема СДИПМ в случае $p = 2$ и $q = 2$ представлена на рис. 1.

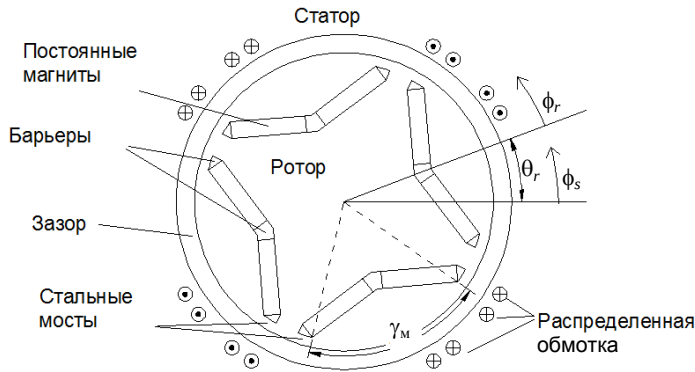


Рис. 1. Схема синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами, $p = 2$ и $q = 2$: θ_r – угол перемещения ротора; ϕ_s – угол между началом отсчета и рассматриваемой точкой на статоре; ϕ_r – то же на роторе

Fig. 1. The scheme of a synchronous motor with permanent magnets incorporated, $p = 2$ and $q = 2$: θ_r – angle of displacement of the rotor; ϕ_s – angle between the reference point and the considered point on the stator; ϕ_r – angle between the reference point and the considered point on the rotor

Значение ϕ_r можно выразить через θ_r и ϕ_s

$$\phi_r = \phi_s - \theta_r.$$

Распределение магнитодвижущей силы (МДС) одной фазы и ее первая гармоника показаны на рис. 2

Магнитодвижущая сила одной фазы представляется в виде суммы членов гармонического ряда [3, 4]

$$F_\phi(\phi_s) = \sum_{v=1}^{\infty} F_{\phi vm} \cos v p \phi_s. \quad (1)$$

Амплитуда v -й гармонической составляющей [3]

$$F_{\phi vm} = \frac{4q}{\pi v} \frac{i w_k}{2} k_{yv} k_{pv}, \quad (2)$$

где $k_{yv} = \sin \frac{v \alpha_y}{2}$ – коэффициент укорочения шага обмотки для v -й гармонической составляющей, характеризующий влияние шага катушки α_y

на амплитуды гармоник МДС; $k_{pv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}}$ – коэффициент распределения для v -й гармонической составляющей; i – ток, протекающий в катушке; w_k – число витков катушки; m – число фаз.

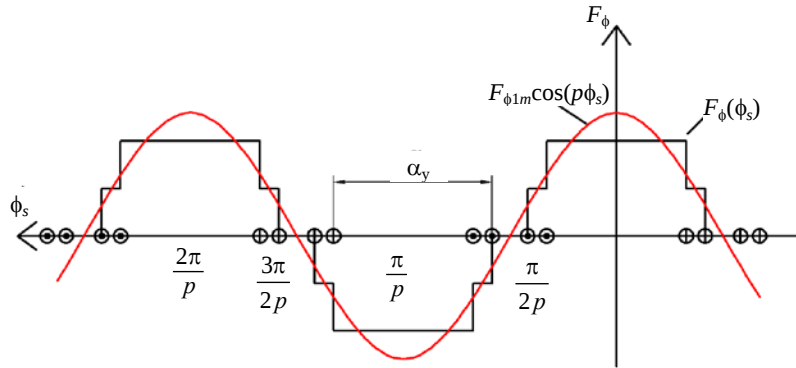


Рис. 2. Распределение магнитодвижущей силы

Fig. 2. The distribution of magnetomotive force

С ростом q обмоточный коэффициент распределения k_{pv} для основной гармонической составляющей уменьшается незначительно. В то же время обмоточные коэффициенты для высших гармонических составляющих резко снижаются. Распределение обмотки по нескольким пазам ослабляет высшие гармонические составляющие в кривой результирующей МДС и улучшает форму поля в воздушном зазоре, приближая ее к синусоиде.

Если пренебречь высшими гармоническими составляющими и допустить, что распределение МДС имеет синусоидальный вид, то получим

$$F_{\phi}(\phi_s) = F_{\phi 1m} \cos(p\phi_s) = \frac{4q}{\pi} \frac{i w_k}{2} k_{y1} k_{p1} \cos(p\phi_s) = \frac{i w_{rp}}{2} \cos(p\phi_s), \quad (3)$$

где $w_{rp} = \frac{4q}{\pi} w_k k_{y1} k_{p1}$ – эквивалентное число витков группы катушки с учетом укорочения шага и распределения обмотки.

Синусоидальное распределение МДС теоретически обеспечивается синусными обмотками, в которых витки распределяются по закону синуса [5, 6]. Число витков группы катушки фаз выражается по закону синуса

$$w(\phi_s) = \frac{p w_{rp}}{2} |\sin(p\phi_s)|. \quad (4)$$

Синусная обмотка и синусоидальная МДС в зазоре представлены на рис. 3.

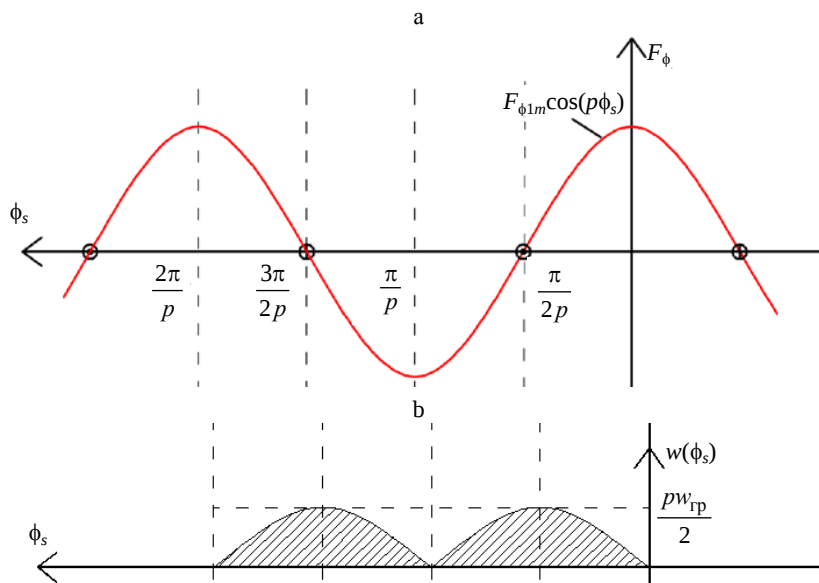


Рис. 3. Синусоидальное распределение: а – магнитодвижущая сила от эквивалентной обмотки; б – эквивалентная распределенная обмотка

Fig. 3. The sinusoidal distribution: a – magnetomotive force from the equivalent winding; b – equivalent distributed winding

Эквивалентный явнополюсный ротор

Ротор с инкорпорированными магнитами обладает сложной структурой, содержащей постоянные магниты, воздушные барьеры и стальные мосты. Вследствие этого аналитический расчет собственных индуктивностей и индуктивностей взаимоиндукции обмотки достаточно сложный. Для упрощения расчета предлагается заменить реальный ротор (рис. 4а) эквивалентным ротором (рис. 4б), в котором постоянные магниты, воздушные барьеры и стальные мосты замещены эквивалентным воздушным зазором.

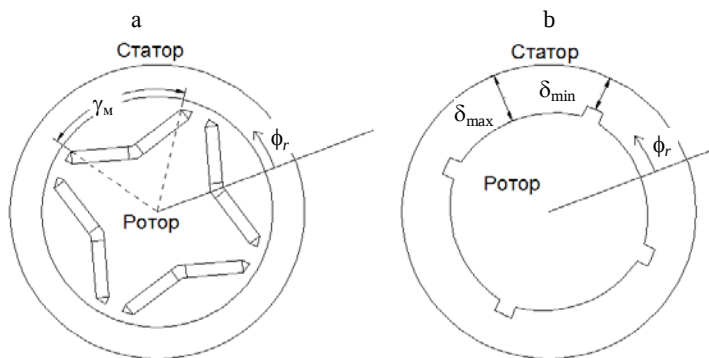


Рис. 4. а – ротор с инкорпорированными магнитами; б – эквивалентный явнополюсный ротор

Fig. 4. a – rotor with magnets incorporated; b – equivalent salient-pole rotor

Замещение осуществляется на основе того, что постоянные магниты и насыщенные стальные мосты имеют магнитную проницаемость для магнитного потока со стороны статора, практически равную магнитной проницаемости воздуха [6–8]. Схема эквивалентного воздушного зазора приведена на рис. 5.

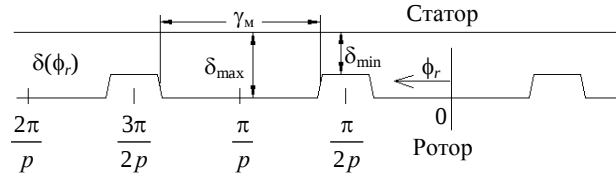


Рис. 5. Схема эквивалентного воздушного зазора

Fig. 5. The scheme of the equivalent air gap

Эквивалентный воздушный зазор описывается функцией:

$$\left. \begin{aligned} \delta(\phi_r) &= \delta_{\max} \quad \text{при} \quad -\frac{\gamma_M}{2p} \leq \phi_r \leq \frac{\gamma_M}{2p}; \\ \delta(\phi_r) &= \delta_{\min} \quad \text{при} \quad -\frac{\pi}{2p} \leq \phi_r \leq -\frac{\gamma_M}{2p} \quad \text{и} \quad \frac{\gamma_M}{2p} \leq \phi_r \leq \frac{\pi}{2p}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\delta_{\min}$, $\delta_{\max}$ – минимальное и максимальное значение эквивалентного воздушного зазора.

Показатель $\delta_{\min}$ определяется из выражения

$$\delta_{\min} = l'_\delta = l_\delta k_c,$$

где $l'_\delta = k_c l_\delta$ – длина эквивалентного воздушного зазора с учетом влияния зубцов статора; k_c – коэффициент Картера.

Значения $\delta_{\max}$ находится из формулы

$$\delta_{\max} = l'_\delta + \frac{\mu_0 w_\delta l_M}{P_M + P_{\text{ст.м}} + P_B},$$

где $w_\delta = \frac{\gamma_M r}{p}$ – ширина угла открытия магнитов; γ_M – угол открытия постоянных магнитов; r – средний радиус зазора; l_M – длина магнита по направлению магнитной индукции; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; P_M – то же постоянных магнитов; $P_{\text{ст.м}}$ – то же стальных мостов; P_B – общая магнитная проводимость барьеров.

Значения P_M , $P_{\text{ст.м}}$, P_B определяются исходя из геометрических размеров постоянных магнитов и их расположения в роторе [9].

Магнитная проводимость постоянных магнитов

$$P_M = 2\mu_M\mu_0 \frac{w_M l_p}{l_M},$$

где w_M – ширина магнита; l_p – длина ротора; μ_M – относительная магнитная проницаемость магнита.

Магнитная проводимость барьеров

$$P_B = P_{b1} + P_{b2} + \dots + P_{bi},$$

где $P_{b1}, P_{b2}, \dots, P_{bi}$ – магнитная проводимость каждого барьера,

$$P_{bi} = \frac{\mu_0 w_{bi} l_p}{l_{bi}}; \quad w_{bi}, l_{bi} \text{ – ширина и длина барьера.}$$

Магнитная проводимость стальных мостов

$$P_{\text{ст.м}} = \frac{\mu_0 2w_{\text{ст.м}} l_p}{l_{\text{ст.м}}},$$

где $w_{\text{ст.м}}, l_{\text{ст.м}}$ – ширина и длина стального моста.

Представим коэффициент удельной магнитной проводимости $\lambda(\phi_r)$

в виде $\lambda(\phi_r) = \frac{1}{\delta(\phi_r)}$. Подставив (5) в $\lambda(\phi_r) = \frac{1}{\delta(\phi_r)}$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \lambda(\phi_r) &= \frac{1}{\delta_{\max}} \text{ при } -\frac{\gamma_M}{2p} \leq \phi_r \leq \frac{\gamma_M}{2p}; \\ \lambda(\phi_r) &= \frac{1}{\delta_{\min}} \text{ при } -\frac{\pi}{2p} \leq \phi_r \leq -\frac{\gamma_M}{2p} \text{ и } \frac{\gamma_M}{2p} \leq \phi_r \leq \frac{\pi}{2p}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Функцию $\lambda(\phi_r)$ представим в виде ряда Фурье

$$\lambda(\phi_r) = \lambda_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \cos 2np\phi_r, \quad (7)$$

где

$$\lambda_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\gamma_M}{\delta_{\max}} + \frac{\pi - \gamma_M}{\delta_{\min}} \right);$$

$$\lambda_n = \frac{2}{\pi n} \sin n\gamma_M \left(\frac{1}{\delta_{\max}} - \frac{1}{\delta_{\min}} \right).$$

Расчет собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции

Для расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции обмоток статора СДИПМ заменим трехфазные распределенные обмотки статора синусными в соответствии с параграфом данной

статьи «Эквивалентная синусная обмотка», а ротор с инкорпорированными магнитами – эквивалентным явнополюсным ротором в соответствии с параграфом «Эквивалентный явнополюсный ротор». Диаграммы синусоидального распределения МДС, эквивалентных синусных обмоток и также эквивалентной длины воздушного зазора трехфазного СДИПМ представлены на рис. 6.

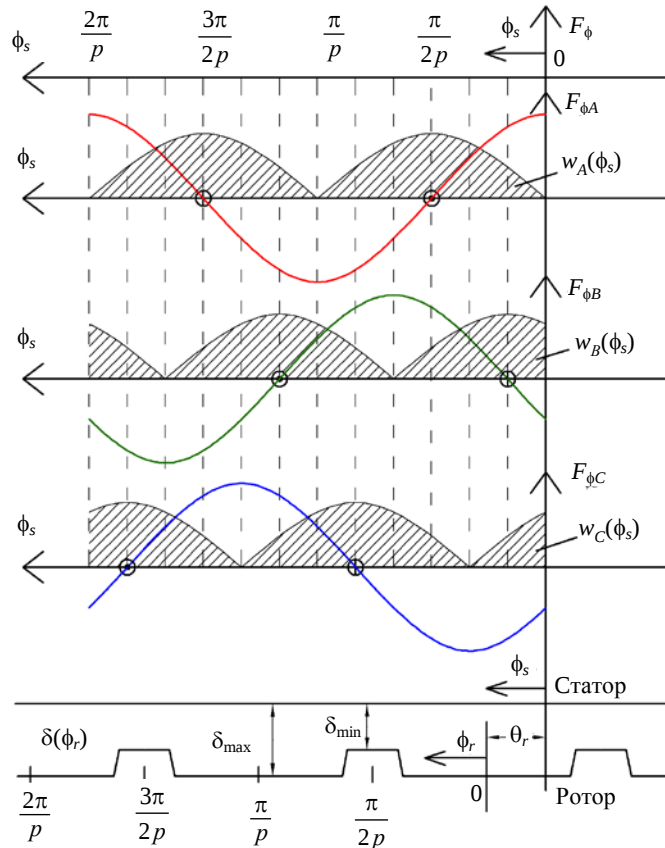


Рис. 6. Распределение магнитодвижущей силы, число витков обмотки фазы и длина зазора

Fig. 6. The distribution of the magnetomotive force, the number of turns of the phase winding and the length of the gap

Обмотки фаз A, B, C замещены эквивалентными синусными обмотками, у которых число витков представлено по закону синуса:

$$w_A(\phi_s) = \frac{pw_{rp}}{2} |\sin(p\phi_s)|; \quad (8)$$

$$w_B(\phi_s) = \frac{pw_{rp}}{2} \left| \sin\left(p\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right) \right|; \quad (9)$$

$$w_C(\phi_s) = \frac{pw_{rp}}{2} \left| \sin\left(p\phi_s + \frac{2\pi}{3}\right) \right|. \quad (10)$$

Распределение МДС, создаваемое током фаз A, B, C , определяется по формулам:

$$F_{\phi A}(\phi_s) = \frac{i_A w_{\text{гр}}}{2} \cos(p\phi_s); \quad (11)$$

$$F_{\phi B}(\phi_s) = \frac{i_B w_{\text{гр}}}{2} \cos\left(p\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (12)$$

$$F_{\phi C}(\phi_s) = \frac{i_C w_{\text{гр}}}{2} \cos\left(p\phi_s + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (13)$$

где i_A, i_B, i_C – ток фаз A, B, C .

При угле перемещения ротора θ_r в точке ϕ_s длина эквивалентного воздушного зазора имеет значение $\delta(\phi_s - \theta_r)$. Значение напряженности магнитного поля, создаваемой током фазы A в точке ϕ_s [3]:

$$H_{\delta A}(\phi_s, \theta_r) = \frac{F_{\phi A}(\phi_s)}{\delta(\phi_s - \theta_r)}.$$

Магнитная индукция, создаваемая током фазы A в точке ϕ_s :

$$B_{\delta A}(\phi_s, \theta_r) = \mu_0 H_{\delta A}(\phi_s, \theta_r) = \mu_0 \frac{F_{\phi A}(\phi_s)}{\delta(\phi_s - \theta_r)}. \quad (14)$$

Подставив $\delta(\phi_s - \theta_r) = \frac{1}{\lambda(\phi_s - \theta_r)}$ и (11) в (14), получим:

$$B_{\delta A}(\phi_s, \theta_r) = \mu_0 \frac{i_A w_{\text{гр}}}{2} \cos(p\phi_s) \lambda(\phi_s - \theta_r). \quad (15)$$

Аналогично найдем магнитную индукцию, создаваемую током фаз B, C :

$$B_{\delta B}(\phi_s, \theta_r) = \mu_0 \frac{i_B w_{\text{гр}}}{2} \cos\left(p\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right) \lambda(\phi_s - \theta_r); \quad (16)$$

$$B_{\delta C}(\phi_s, \theta_r) = \mu_0 \frac{i_C w_{\text{гр}}}{2} \cos\left(p\phi_s + \frac{2\pi}{3}\right) \lambda(\phi_s - \theta_r). \quad (17)$$

Магнитный поток, создаваемый током фазы A , пронизывающий через поверхность ротора от угла ϕ_s до угла $\phi_s + \frac{\pi}{p}$:

$$\Phi_A(\phi_s, \theta_r) = \int_{\phi_s}^{\phi_s + \frac{\pi}{p}} B_{\delta A}(\phi_s, \theta_r) r l_p d\phi_s, \quad (18)$$

где r – средний радиус воздушного зазора.

Поставив (15) в (18), получим:

$$\Phi_A(\phi_s, \theta_r) = \mu_0 \frac{i_A w_{\text{гр}}}{2} r l_p \int_{\phi_s}^{\phi_s + \frac{\pi}{p}} \cos(p\phi_s) \lambda(\phi_s - \theta_r) d\phi_s. \quad (19)$$

Аналогично магнитный поток, создаваемый током фаз B , C и пронизывающий через поверхность ротора от угла ϕ_s до угла $\phi_s + \frac{\pi}{p}$:

$$\Phi_B(\phi_s, \theta_r) = \mu_0 \frac{i_B w_{\text{гр}}}{2} r l_p \int_{\phi_s}^{\phi_s + \frac{\pi}{p}} \cos\left(p\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right) \lambda(\phi_s - \theta_r) d\phi_s; \quad (20)$$

$$\Phi_C(\phi_s, \theta_r) = \mu_0 \frac{i_C w_{\text{гр}}}{2} r l_p \int_{\phi_s}^{\phi_s + \frac{\pi}{p}} \cos\left(p\phi_s + \frac{2\pi}{3}\right) \lambda(\phi_s - \theta_r) d\phi_s. \quad (21)$$

Для расчета собственной индуктивности фазы A определим потоко-сцепление от магнитного потока, создаваемого током фазы A , на обмотку фазы A

$$\Psi_{AA}(\theta_r) = L_0 i_A + p \int_{\frac{\pi}{p}}^{\frac{2\pi}{p}} w_A(\phi_s) \Phi_A(\phi_s, \theta_r) d\phi_s, \quad (22)$$

где L_0 – индуктивность рассеяния обмотки.

Подставив (8), (18) и (7) в (22), проинтегрировав, получим

$$\Psi_{AA}(\theta_r) = L_0 i_A + i_A \left(\frac{w_{\text{гр}}}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l_p \left(\lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_1 \cos(2p\theta_r) \right). \quad (23)$$

Надо отметить, что в (23) отсутствуют все гармонические составляющие выше первой у $\lambda(\phi_r)$ благодаря синусной функции $w_A(\phi_s)$.

Собственная индуктивность фазы A

$$L_{AA}(\theta_r) = \frac{\Psi_{AA}(\theta_r)}{i_A} = L_0 + \left(\frac{w_{\text{гр}}}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l_p \left(\lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_1 \cos(2p\theta_r) \right).$$

Для расчета взаимной индукции от обмотки фазы B на обмотку фазы A нужно определить потокоцепление от магнитного потока, созданного током фазы B на обмотку фазы A

$$\Psi_{AB}(\theta_r) = p \int_{\frac{\pi}{p}}^{\frac{2\pi}{p}} w_A(\phi_s) \Phi_B(\phi_s, \theta_r) d\phi_s. \quad (24)$$

Подставив (8), (20) и (7) в (24), проинтегрировав, получим

$$\Psi_{AB}(\theta_r) = i_B \left(\frac{w_{rp}}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l_p \frac{1}{2} \left(-\lambda_0 + \lambda_1 \cos \left(2p\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \right). \quad (25)$$

Взаимная индукция от фазы B на фазу A

$$M_{AB}(\theta_r) = \frac{\Psi_{AB}(\theta_r)}{i_B} = \frac{1}{2} \left(\frac{w_{rp}}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l_p \left(-\lambda_0 + \lambda_1 \cos \left(2p\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \right).$$

Остальные потокоцепления, собственные индуктивности и взаимные индукции определяются аналогичным образом. Если обозначим:

$$L_1 = \left(\frac{w_{rp}}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l_p \lambda_0;$$

$$L_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{w_{rp}}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l_p \lambda_1,$$

то получим компактный вид собственных индуктивностей и взаимных индукций:

$$L_{AA}(\theta_r) = L_0 + L_1 - L_2 \cos(2p\theta_r); \quad (26)$$

$$L_{BB}(\theta_r) = L_0 + L_1 - L_2 \cos 2 \left(p\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (27)$$

$$L_{CC}(\theta_r) = L_0 + L_1 - L_2 \cos 2 \left(p\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right); \quad (28)$$

$$M_{AB}(\theta_r) = M_{BA}(\theta_r) = -\frac{1}{2} L_1 - L_2 \cos 2 \left(p\theta_r - \frac{\pi}{3} \right); \quad (29)$$

$$M_{AC}(\theta_r) = M_{CA}(\theta_r) = -\frac{1}{2} L_1 - L_2 \cos 2 \left(p\theta_r + \frac{\pi}{3} \right); \quad (30)$$

$$M_{BC}(\theta_r) = M_{CB}(\theta_r) = -\frac{1}{2}L_1 - L_2 \cos 2(p\theta_r). \quad (31)$$

Обозначим матрицу индуктивностей по осям abc

$$L_s = \begin{bmatrix} L_A(\theta_r) & M_{AB}(\theta_r) & M_{AC}(\theta_r) \\ M_{BA}(\theta_r) & L_B(\theta_r) & M_{BC}(\theta_r) \\ M_{CA}(\theta_r) & M_{CB}(\theta_r) & L_C(\theta_r) \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Матрица индуктивностей по осям dq получается путем преобразования матрицы индуктивностей по осям abc на оси dq [10]

$$L_{dq} = K_s L_s K_s^{-1}, \quad (33)$$

где $L_{dq} = [L_d \ L_q \ 0]^T$ – матрица индуктивностей по осям dq ; K_s – матрица преобразования по осям abc на dq :

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_r & -\sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}; \quad (34)$$

K_s^{-1} – матрица обратного преобразования, также обратная матрица к K_s .

Подставим (26)–(32), (34) в (33) и получим индуктивности по осям d и q :

$$L_d = L_0 + \frac{3}{2}L_1 - \frac{3}{2}L_2;$$

$$L_q = L_0 + \frac{3}{2}L_1 + \frac{3}{2}L_2.$$

На основе полученного метода проведен аналитический расчет индуктивностей для СДИПМ. Расчет индуктивностей СДИПМ также осуществлен методом конечных элементов с помощью программы FEMM. При вычислениях пренебрегали индуктивностью рассеяния обмотки $L_0 = 0$. Сравнение результатов расчета двумя методами представлено на рис. 7. Индуктивности L_d , L_q , рассчитываемые аналитическим методом, не зависят от тока статора и изображены штриховыми линиями. Индуктивности L_d , L_q , рассчитываемые методом конечных элементов, изображены сплошными линиями. Так как индуктивность L_d практически не зависит от тока статора, отличие между аналитическим расчетом и методом конечных элементов незначительно и не превышает 10 % (рис. 7а). Расходимость результа-

тов аналитического расчета и МКЭ индуктивности L_d можно объяснить отсутствием учета насыщения ферромагнитных участков магнитной цепи. Однако значения момента, рассчитываемого МКЭ и аналитическим методом, при небольшом токе статора практически совпадают (рис. 7b).

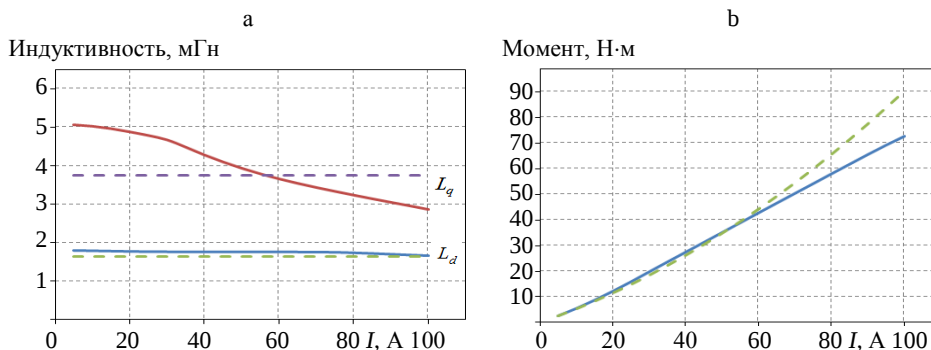


Рис. 7. Сравнение разработанной аналитической методики и метода конечных элементов:

- а – индуктивности L_d , L_q в зависимости от тока статора;
 б – момент в зависимости от тока статора; штриховая линия – расчет аналитическим методом; сплошная линия – расчет методом конечных элементов

Fig. 7. Comparison of the analytical methods that have been developed and the finite element method: а – inductance of L_d , L_q depending on the stator current;

- б – torque depending on the stator current; dashed line – an analytical solution;
 solid line – a calculation by finite element method

ВЫВОД

1. Получены математические выражения, позволяющие заместить ротор с инкорпорированными постоянными магнитами эквивалентным явно-полюсным ротором.

2. Разработана методика расчета индуктивностей и взаимоиндукции для синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами на основе понятия эквивалентной синусной обмотки и эквивалентного воздушного зазора.

3. Осуществлен сравнительный анализ результатов разработанного аналитического метода и метода конечных элементов. Погрешность расчета аналитическим методом не превышает 10 % по сравнению с методом конечных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Silvester, P. P. Finite Elements for Electrical Engineers / P. P. Silvester, R. L. Ferrari. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 1996. 514 p. DOI: 10.1017/CBO9781139170611.
2. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поле и программа FEMM / О. Б. Буль. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 336 с.
3. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1980. 928 с.

4. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
5. Paul, C. Krause. Analysis of Electric Machinery and Drive System / C. Krause Paul, O. Wasunczuk, D. Sunhoff Scott. 2nd. New York: IEEE Press, 2002. 613 p. DOI: 10.1109/9780470544167.
6. Miller, T. J. E. Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drive / T. J. E. Miller. New York; Oxford: Clarendon Press, 1989. 207 p.
7. Gieras, J. F. Permanent Magnet Motor Technology Design / J. F. Gieras, M. Wing. New York: Marcel Dekker, 2002. 590 p.
8. Ледовский, А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. М.: Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
9. Нго, Фыонг Ле. Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами / Фыонг Ле Нго, Г. И. Гульков // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 4. С. 13–24.
10. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие для вузов / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. 2-е изд. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.

Поступила 17.11.2016 Подписана в печать 21.01.2017 Опубликовано онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. Silvester P. P., Ferrari R. L. (1996) *Finite Elements for Electrical Engineers*. 3rd ed. New York, Cambridge University Press. 514. DOI: 10.1017/CBO9781139170611.
2. Bul O. B. (2005) *Methods of Calculation of Magnetic Systems of Electrical Machines: Magnetic Circuits, the Field and the FEMM Program*. Moscow, Academia Publishing Center. 336 (in Russian).
3. Ivanov-Smolenskiy A. V. (1980) *Electrical Machines*. Moscow, Energiya Publ. 928 (in Russian).
4. Voldek A. I. (1978) *Electrical Machines*. 3rd ed. Leningrad, Energiya Publ. 832 (in Russian).
5. Paul C. Krause, Wasunczuk O., Sunhoff D. Scott (2002) *Analysis of Electric Machinery and Drive System*. 2nd ed. New York, IEEE Press. 613. DOI: 10.1109/9780470544167.
6. Miller T. J. E. (1989) *Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drive*. New York, Clarendon Press. 207.
7. Gieras J. F., Wing M. (2002) *Permanent Magnet Motor Technology Design*. New York, Marcel Dekker. 590.
8. Ledovskii A. N. (1985) *Electrical Machines with Highly Coercive Permanent Magnets*. Moscow, Energoatomizdat. 168 (in Russian).
9. Ngo Fyong Le, Gulkov G. I. (2015) Magnetic Circuit Equivalent of the Synchronous Motor with Incorporated Magnets. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (4), 13–24 (in Russian).
10. Firago B. I., Pavlyachik L. B. (2007) *Electric Drive Theory*. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ. 585. (in Russian).

Received: 17 November 2016 Accepted: 21 January 2017 Published online: 7 March 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158

УДК 662.8.053.33; 662.8.053.2

Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения

Б. М. Хрусталеv¹⁾, А. Н. Пехота¹⁾

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

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

Реферат. В Беларуси нефтеперерабатывающим и нефтедобывающим отраслям уделяется пристальное внимание. На фоне активного сохранения уровня переработки и объемов добычи нефти в нашей республике и странах Евразийского экономического союза происходит устойчивое образование углеводородсодержащих отходов, поэтому их переработка – актуальная задача, способная повысить конкурентоспособность производства, а их эффективное использование относится к важным экономическим и экологическим задачам для многих стран. Наиболее экономически оправданным способом использования углеводородсодержащих отходов является их переработка в энергоресурсы. В данном случае можно получить значительный энергетический и экономический эффект от совместного использования углеводородсодержащих, древесных, сельскохозяйственных и иных горючих отходов, улучшив при этом экологическую обстановку в местах складирования отходов и создавая твердое топливо с необходимыми энергетическими и физико-химическими свойствами. Комплексное решение проблемы переработки отходов позволяет использовать многие не нашедшие применения в других технологиях отходы в качестве энергоресурсов, производить альтернативное многокомпонентное топливо с составом, обеспечивающим экологические и энергетические требования для локальных систем теплоснабжения. Кроме того, внедрение такой технологии сделает возможным сокращение энергозатрат предприятий различного назначения, потребляющих топливо, увеличит долю местных видов топлива в энергетическом балансе конкретного региона.

Ключевые слова: углеводородсодержащие отходы, многокомпонентное твердое топливо, практическая применимость

Для цитирования: Хрусталеv, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 2. С. 147–158. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158

Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems

B. M. Khroustalev¹⁾, A. N. Pekhota¹⁾

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

Abstract. In Belarus oil refining and oil producing industries are paid close attention. On the background of the active maintaining the level of oil processing and volume of oil extraction

Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-77-52
rector@bntu.by

Address for correspondence

Khroustalev Boris M.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-77-52
rector@bntu.by

Abstract. In Belarus oil refining and oil producing industries are paid close attention. On the background of the active maintaining the level of oil processing and volume of oil extraction in our country and in the countries of the Eurasian Economic Union there is a steady formation of hydrocarbon-containing waste; therefore recycling of the latter is an urgent task to improve the competitiveness of production. The most cost-effective way of using hydrocarbon waste is the conversion of it into power resources. In this case it is possible to obtain significant power-saving and economic effect of the combined use of a hydrocarbon, wood, agricultural and other combustible waste, meanwhile improving the ecological situation at the sites of waste storage and creating a solid fuel with the necessary energy and specified physical-and-chemical properties. A comprehensive solution of a recycling problem makes it possible to use as energy resources a lot of waste that has not found application in other technologies, to produce alternative multi-component fuel which structure meets environmental and energy requirement for local heating systems. In addition, the implementation of such technology will make it possible to reduce power consumption of enterprises of various kinds that consume fuel and will also increase the share of local fuels in the energy balance of a particular region.

Keywords: hydrocarbon wastes, multicomponent solid fuel, practical applicability

For citation: Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2017) Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (2), 147–158. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158 (in Russian)

В настоящее время остро стоит задача экологической безопасности и бережного отношения к природе, и в первую очередь к использованию нефтесодержащих ресурсов, имеющих огромное значение в системе жизнеобеспечения. Руководство страны пристальное внимание уделяет нефтеперерабатывающим и нефтедобывающим отраслям. На фоне активного сохранения уровня переработки и объемов добычи нефти в Беларуси и странах Евразийского экономического союза происходит устойчивое образование углеводородсодержащих отходов, при этом нужно иметь в виду, что сфера образования таких отходов очень велика и не ограничивается только упомянутыми отраслями. Поэтому переработка нефтесодержащих (углеводородсодержащих) отходов – один из актуальных вопросов, способных повысить конкурентоспособность производства, а их эффективное использование относится к важным экономическим и экологическим задачам для многих стран.

С целью сокращения негативного воздействия отходов на окружающую среду и улучшения энергоресурсообеспечения экономики необходимо создание ресурсосберегающих, экологически чистых технологий, а на их основе – производств по переработке образующихся отходов для получения сортовых товарных продуктов. Различный диапазон составов образующихся отходов требует разработки экономически целесообразных и экологически эффективных технологий для решения проблемы их комплексного использования. При этом сложность рассматриваемой проблемы обуславливается противоречиями между возрастающим объемом промышленных отходов производства и малоэффективными или «неподъемными» по стоимости и срокам окупаемости технологиями.

Переработка углеводородсодержащих отходов затруднена их составом, в основном представленным смесями, насыщенными углеводородсодержащими соединениями, из которых состоят нефтепродукты, а в отхо-

дах присутствуют механические примеси и вода в различном состоянии. При этом они обладают значительным энергетическим потенциалом вследствие высокого содержания углерода (86–88 %) и водорода (10–14 %).

Одним из экономически оправданных способов использования углеводородсодержащих отходов является, по мнению авторов, их переработка в энергоресурсы. Именно поэтому в последние годы наряду с природными видами топлива находят применение искусственные его виды, получение которых связано с переработкой накопленных и образующихся отходов (нефтесодержащих, сельскохозяйственных, древесных, угольных, торфяных и т. п.). Такой подход позволяет эффективно решать проблемы экономики традиционных видов энергоресурсов и увеличивать долю местных видов топлива, используя имеющиеся производственные отходы, образующиеся в процессе хозяйственно-экономической деятельности различных предприятий.

Общая классификация искусственных видов топлива представлена на рис. 1.

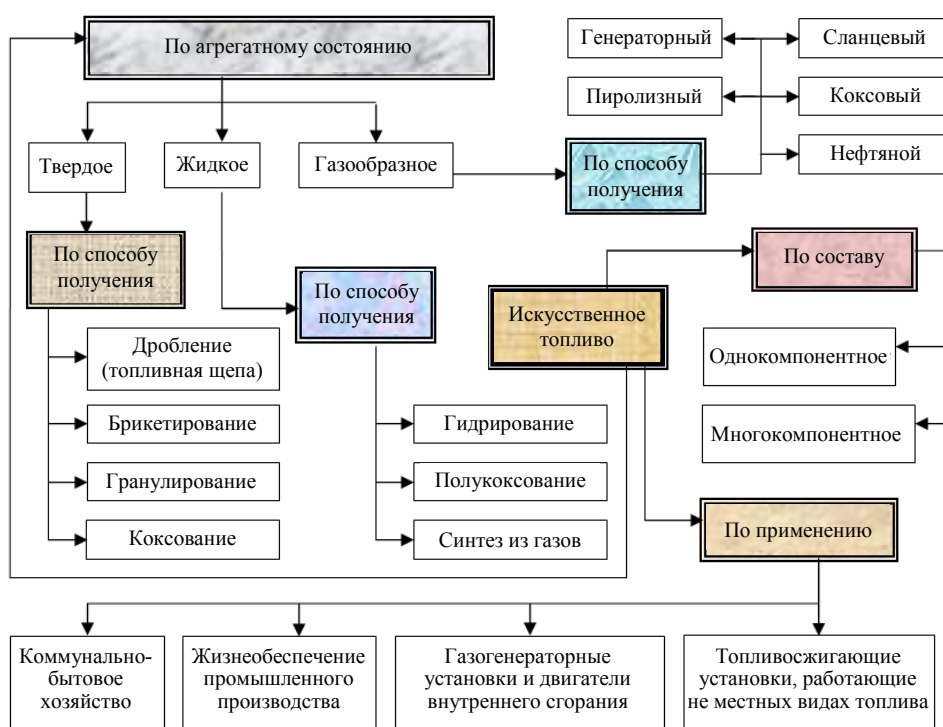


Рис. 1. Общая классификация «искусственных» видов топлива

Fig. 1. A general classification of “synthetic” fuels

Как видно из рис. 1, не все энергетические ресурсы и не всегда потребляются в их непосредственном виде. В последнее время некоторые виды топлива, прежде чем поступить к потребителю, подвергаются «облагораживанию» (обогащению), переработке и преобразованию. Например, с развитием науки, техники и технологий наравне с традиционными видами

печного топлива, такими как дрова, газ, мазут, в промышленной энергетике и в локальных системах теплоснабжения активно применяются различные виды древесного топлива в виде щепы, гранулированного и брикетированного топлива, которые могут производиться из разных отходов сельскохозяйственного и деревоперерабатывающего производства, лесозаготовок, древесно-кустарниковой растительности, не нашедших технологического применения по различным причинам (окисление, изменение внешнего вида, засорение механическими примесями, нефтепродуктами и т. п.).

Основная концепция предлагаемого использования нефтесодержащих отходов заключается в добавлении в состав топлива определенной экологически безопасной пропорции углеводородсодержащих отходов при производстве сортового твердого топлива на основе древесно-растительного сырья, вследствие чего достигается увеличение приемлемых и необходимых энергетических показателей теплоты сгорания, при которых потребительские характеристики топлива соответствуют требованиям стандартов. Более того, разработанные технологические решения позволяют при производстве твердого топлива применять углеводородсодержащие отходы в качестве гидрофобизатора, а вязкие отходы этой группы – в качестве связующего компонента. К тому же в составе топлива могут быть использованы опилки, ветошь, фильтрующие элементы фильтров различного назначения. Полученное предложенным способом топливо названо авторами топливом твердым многокомпонентным (ТТМ, или англ. multicomponent solid fuel – MSF) [1].

Исследования в обозначенных направлениях проведены в Белорусском национальном техническом университете кафедрами «Теплогазоснабжение и вентиляция» и «Промышленная теплоэнергетика». Одним из результатов является разработка технологии производства твердого топлива на основе смеси древесных или сельскохозяйственных и вязких нефтесодержащих отходов, позволяющей применять его без переоборудования в локальных системах теплоснабжения, работающих на твердом топливе. Полученное ТТМ обеспечивает полное сжигание используемых в нем горючих материалов с выделением заданных теплотехнических характеристик, при этом оно удовлетворяет требованиям транспортировки и хранения, обеспечивая сохранение свойств и качественных характеристик горючей массы [2].

В основе исследований – трансформирование подходов, изучение закономерностей процессов и усовершенствование технологических схем производства твердого топлива методом влажного брикетирования различных многокомпонентных составов. Например, определены оптимальные параметры процесса брикетирования смеси древесных отходов и нефтешламов, установлено и найдено уравнение регрессии, позволяющее при получении разработанного топлива определять производительность прессы при формировании брикетов в диапазоне изменения влажности прессуемой смеси от 30 до 50 %. Так, она достигает максимального значения при влажности формуемой смеси $(43,4 \pm 0,9) \%$ в диапазоне изменения доли нефтешламов от 10 до 30 %.

Технология получения ТТМ базируется на брикетировании отходов с использованием в качестве основного компонента сыпучих отходов био-

массы (древесных, сельскохозяйственных, лесозаготовительных отходов, лигнина, сапропеля и т. п.) или некондиционных горючих минеральных ресурсов (угля, торфа и т. п.), которые смешиваются со связующим компонентом. В качестве связующего компонента предлагается использовать преимущественно вязкие отходы нефтепродуктов (нефтешламы, отработанные нефтепродукты, донные отложения мазутных резервуаров и т. п.). Однако в случае их отсутствия (окончания) в процессе производства тот же эффект соединения частиц сыпучих отходов на описываемой установке достигается за счет применения иных связующих добавок (минеральных, полимерных и пр.), в том числе из отходов.

Разработанная и запатентованная технология и составы топлива [3–5] позволяют брикетировать ТТМ с применением различных промышленных, сельскохозяйственных, деревообрабатывающих отходов в оптимальных соотношениях. Так, получение ТТМ с использованием отходов деревообрабатывающей промышленности (опилки, стружка, пыль) дает возможность в качестве наполнителей добавлять угольную пыль и торф. Дополнительно в качестве армирующего волокна допускается использование измельченной ветоши, волокнистых сорбентов, насыщенных нефтепродуктами, утилизация которых в других технологиях крайне затруднена. При этом не исключается возможность применения в качестве наполнителей или основного компонента различных отходов сельскохозяйственного производства, имеющих брикетируемую волокнистую структуру (солома, измельченные стебли растений и листья, отходы льна и шерсти, кожевенные отходы и др.).

В качестве иллюстрации на рис. 2 схематично приведена информация, дающая представление об основном комплексе технологического оборудования опытно-промышленной установки, которое позволяет обеспечивать технологический процесс получения ТТМ, включающий следующие этапы: подготовку отходов, измельчение (0,1–5,0 мм), дозирование и перемешивание компонентов, прессование массы, сушку в естественных условиях или сушильной камере.

Работа установки выполняется в такой последовательности: предварительно подготовленная смесь из расходного бункера-смесителя поступает в шнековый пресс, где уплотняется, затем перемещается через коническую формующую насадку шнекового пресса при давлении 20 МПа с образованием внутреннего сквозного продольного отверстия в формируемом брикете. Для получения многокомпонентного топлива с оптимальными экологическими выбросами при его сжигании необходимо соблюдать следующие соотношения используемых отходов:

- основное сырье – частицы размером до 5 мм (отходы деревообработки, сельскохозяйственные отходы и т. п.) – не менее 70 % (допускается присутствие мелких частиц размером до 10 мм, объемом не более 20 %);
- связующее сырье в виде углеводородсодержащих вязких отходов (нефтешламы, отработанные нефтепродукты, донные отложения нефтемазутных резервуаров и т. п.) – не более 30 %;

• добавки (при необходимости) – промасленная ветошь или сорбенты, насыщенные нефтепродуктами (материал сорбента – торф, мох, лигнин и т. п.) – не более 5 % [6].

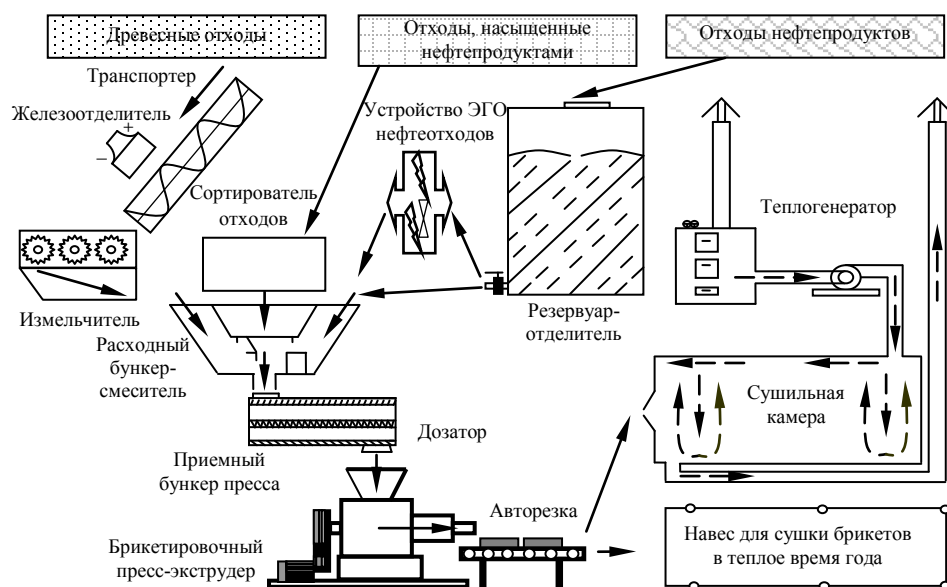


Рис. 2. Схема промышленной установки
производства топлива твердого многокомпонентного

Fig. 2. The scheme of industrial plant for manufacturing multi-component solid fuel

Подготовленная смесь характеризуется влажностью не менее 42–45 % и долей нефтесодержащих веществ в смеси, определяемой в зависимости от используемых видов углеводородсодержащих отходов, а также с учетом требуемых теплотехнических свойств. При необходимости в установке применяется устройство электрогидравлической обработки (ЭГО) нефтесодержащих отходов, позволяющее уменьшать содержание серы в отходах, что в целом дает возможность регулировать и обеспечивать допустимое содержание серы в физико-химическом составе производимого топлива на экологически необходимом уровне.

Внешний вид установки, преобразующей энергию в импульсы тока микросекундной длительности для электрогидравлической обработки нефтесодержащих отходов, представлен на рис. 3. Сущность работы этого устройства состоит в том, что во влажной среде нефтесодержащих отходов возникает высокое давление в результате специально сформированного импульсного (искрового, кистевого) высоковольтного электрического разряда между электродами, через которые происходят разряды. Вокруг зоны образования разрядов возникают сверхвысокие гидравлические давления, способные совершать полезную механическую работу и сопровождающиеся комплексом физических и химических явлений. В соответствии с ранее проведенными исследованиями давление этих разрядов достигает 300 МН/м^2 в рабочей среде (обычно в обводненной смеси или высоко-влажной среде).

Это давление используется для механического воздействия на материал при его подготовке, что позволяет, задавая определенные параметры разрядов, производить обработку, очистку, эмульгацию, деэмульгацию, размол, разделение и др. Энергия, необходимая для электрического разряда, накапливается в конденсаторах установки емкостью от 10 до 1500 мкФ. В применяемой установке амплитуда ударной волны на расстоянии 10 мм от рабочего органа достигает 50–190 МПа с длительностью разряда не более 200 мкс.



Рис. 3. Внешний вид установки, преобразующей энергию в импульсы тока микросекундной длительности для электрогидравлической обработки нефтесодержащих отходов

Fig. 3. Outward appearance of the apparatus that convert the energy into current pulses of microsecond duration for electrohydraulic processing of oily waste

Эксперименты на различных поступающих на переработку нефтесодержащих отходах (нефть, нефтешламы, нефтесодержащий шлам очистных сооружений и т. п.) показали, что при электрогидравлической обработке интенсивно отделяются разного рода вредные примеси, и прежде всего сера. Сернистые соединения активно удаляются из обрабатываемого отхода (в зависимости от типа и вида поступающих отходов) либо в виде летучих соединений – сероводорода, либо выпадают в осадок, ранее находившийся в виде несорбируемого соединения, после электрогидравлической обработки переходящего в сорбируемое. Исследованиями, проведенными ранее другими учеными, отмечено, что более активное связывание серы наблюдается в том случае, если в состав нефтесодержащих отходов входил определенный реагент, подвергающийся электрогидравлической обработке вместе с ней [7].

Отличием разработанной технологии влажного брикетирования смеси от технологии брикетирования, например брикетов RUF, Pini Kay, при которой качественные показатели брикета достигаются только за счет спекания имеющихся в прессуемой массе смол и лигнина, является то, что в разработанной технологии производства ТТМ пресс уплотняет влажную массу смеси нефтешламовых отходов при определенной влажности.

Данные изменения геометрических размеров влажного топлива различной формы, спрессованного при влажности 42–45 % и затем высушенного, пред-

ставлены на рис. 4. Присутствующие в формируемой массе нефтесодержащие отходы выступают в качестве связующего, выполняют функцию смазки, что способствует безостановочному (непрерывному) прохождению брикета внутри рабочего канала, образованного конической втулкой и матрицей-фильерой, при этом они придают формируемой массе пластичность, гидрофобные свойства и, в конечном итоге, повышают теплоту сгорания топлива.

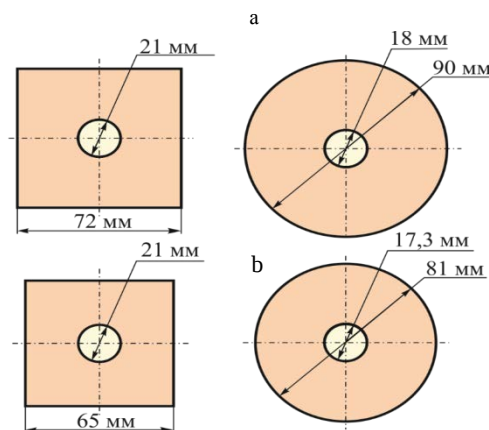


Рис. 4. Изменение размеров многокомпонентного топлива различной формы:
а – влажные брикеты; б – брикеты после сушки

Fig. 4. Resizing of multi-component fuel of various forms:
а – wet briquettes; б – briquettes after drying

Изменяя насадку матрицы-фильеры на установке, можно производить гранулированное топливо диаметром от 14 мм, кусковое топливо разных типоразмеров (как правило, от 25 мм) и брикеты различной формы и типоразмеров (диаметром 50–120 мм) [8].

Зависимость производительности P от влажности w и доли нефтешламов x , согласно полученному уравнению регрессии, в виде поверхности в трехмерной системе координат представлена на рис. 5 [1].

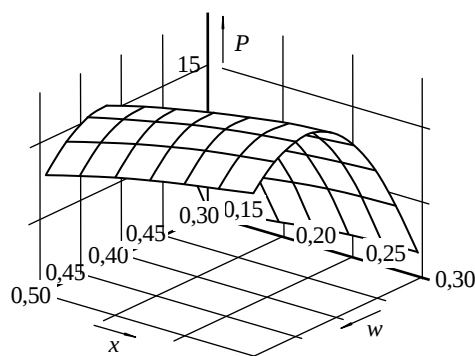


Рис. 5. Зависимость производительности P от влажности w
и доли нефтешламов x

Fig. 5. The dependency of performance P on the moisture content w
and on the proportion of oil sludge x

На выходе из рабочего канала пресса температура брикета ΔT повышается на 10–15 °С, что обеспечивает и с запасом удовлетворяет требованиям пожаробезопасности. В то же время небольшое повышение температуры способствует ускорению сушки сформованных брикетов.

Влажность смеси в разработанной установке играет важную роль и в первую очередь влияет на производительность. Так, при влажности менее 30 % прессуемая масса не формуется при рабочих параметрах пресса. По мере роста влажности смеси производительность пресса сначала растет, достигает максимума, а затем уменьшается. Причем при влажности более 60 % формуемая масса становится пастообразной, что не позволяет получать полноценный удерживающий заданную форму брикет, пригодный для транспортировки и сушки.

Многообразие физико-химических и структурно-реологических процессов, протекающих в период формирования структурного каркаса брикета, обусловлено множеством факторов. Влияние каждого из них оказывает воздействие на интенсивность адгезионных взаимодействий как во время подготовки брикетной смеси, так и при ее прессовании.

Среди основных факторов, оказывающих существенное структурообразующее действие, прежде всего следует учитывать гранулометрический состав, активность поверхности, влажность прессуемых компонентов, условия и пропорции смешивания компонентов, давление прессования. Гранулометрический состав определяется суммарной поверхностью соприкосновения прессуемых частичек, числом и величиной пустот в структурном каркасе топлива, содержанием остроугольных частиц, рельефом их поверхности и обязательным наличием пылевидных частиц [1].

Работы ученых в направлении широкого использования разнородных многокомпонентных составов не прекращаются и достигли уровня, позволяющего в процессе подготовки многокомпонентных смесей определять влияние доли нефтешламов в брикете на построение модели распространения выбросов при сжигании такого топлива из одиночного источника с целью установления величины доли нефтешламов, которая учитывает экологические требования. Зависимость безразмерной приземной концентрации q от доли древесных отходов в брикете x для оксидов азота представлена на рис. 6. Особенностью графика рис. 6 является наличие у кривой $q(x)$ минимума максимальной безразмерной приземной концентрации вредных выбросов.

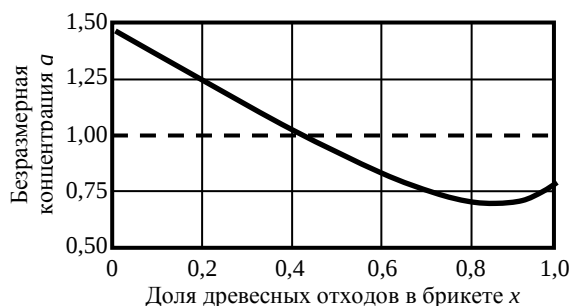


Рис. 6. Зависимость безразмерной концентрации q для NO_x от доли древесных отходов в брикете x

Fig. 6. The dependence of dimensionless concentration q for NO_x on the share of wood waste briquette x

При получении ТТМ с использованием нефтесодержащих отходов последние выполняют ряд функций: являются связующим компонентом при производстве этого вида топлива; увеличивают до необходимого (задаваемого) уровня теплотехнические характеристики получаемого топлива, а при высыхании обеспечивают гидрофобными свойствами получаемое топливо. Результаты исследования гидрофобных свойств твердого топлива путем полного погружения в воду различных его видов представлены на рис. 7.

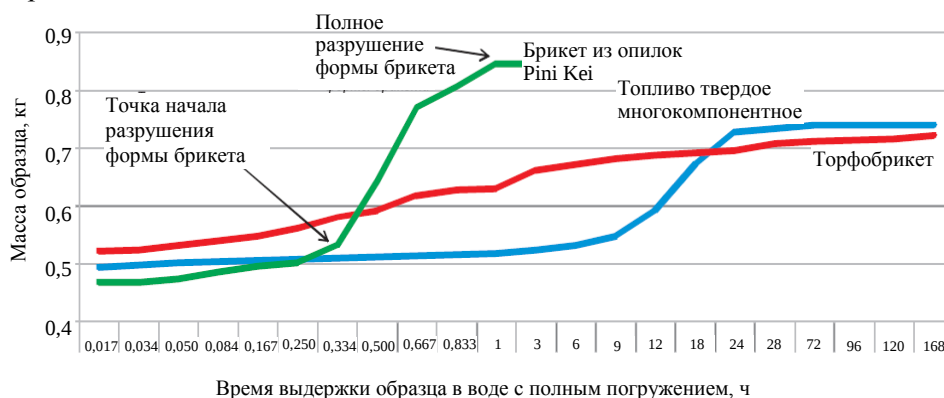


Рис. 7. Изменение массы различных видов твердого топлива, погруженного в воду

Fig. 7. The alteration of the mass of different types of submerged solid fuel

Применение нефтесодержащих отходов в технологиях брикетирования горючих сыпучих отходов в виде спрессованных брикетов решает ряд комплексных задач (комбинированная утилизация различных видов отходов, складирование и транспортировка продукции без пыления и проливов). Научная новизна данной технологии состоит не только в разработке установки, технологического процесса производства и оптимальных составов топлива, но и в получении математической модели, позволяющей с учетом физико-химического состава используемых компонентов, особенностей энергоустановки, применяемой впоследствии для сжигания произведенного топлива, рассчитать оптимальное с энергетической и экологической точек зрения соотношение компонентного состава. Сравнительные данные по теплоте сгорания различных видов топлива представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение теплоты сгорания различных видов топлива
Comparison of the heat of combustion of various fuels

Теплота сгорания, МДж/кг, для топлива						
Топливо твердое многокомпонентное	Торф	Бурий уголь	Антрацит	Древесина	Нефть	Мазут
18,0–21,0	8,0–21,0	19,3–31,0	34,3	12,5	42,0	40,3–41,3

Возможность использования топлива твердого многокомпонентного, произведенного по ТУ ВУ 490319372.001–2005 «Топливо твердое многокомпонентное», в соответствии с назначением пригодности для сжигания

в бытовых топках, котлах и промышленных котельных согласована с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и Госстандартом Республики Беларусь. Разработанная передвижная установка марки УПНДО-0,35 прошла регистрацию в реестре Минприроды (РУП «Бел НИЦ «Экология») под реестровым номером 2287.

Себестоимость производства в соответствии с технико-экономическими характеристиками полученного твердого топлива «Марки 4» с использованием смеси нефтепродуктов отработанных и древесных отходов составляет 25,5 дол. США. Отпускная цена твердого топлива, определенная на 5 % ниже стоимости одной тонны дров в поленнице (кругляк), – 31,4 дол. США. Окупаемость установки – 28–30 мес. (в зависимости от марок выпускаемого топлива, при двухсменном режиме работы и с учетом того, что монтаж установки производится в существующем здании).

Дополнительное экономическое преимущество и социальное значение производства топлива твердого многокомпонентного определяются при изучении рынка утилизации нефтесодержащих отходов. Так, в настоящее время на этом рынке принципиально изменяются взаимоотношения предприятий, на которых образуются отходы, с предприятиями, их утилизирующими и перерабатывающими, выражающиеся в необходимости компенсации затрат на переработку нефтесодержащих отходов.

Таким образом, за счет компенсации стоимости производства твердого топлива на основе смеси древесно-растительных и вязких нефтесодержащих отходов собственником этих отходов стоимость готовой продукции может существенно уменьшиться или полностью компенсироваться. При этом топливо с «нулевой» ценой может использоваться на социальных объектах в целях частичного сокращения расходов государства на их содержание.

Такое комплексное решение проблемы переработки отходов позволяет применять малоиспользуемые ресурсы (отходы), не потребляемые в других технологиях в качестве энергоресурсов, производить твердое топливо с многокомпонентным составом, обеспечивающим экологические и энергетические требования котельной. Внедрение разработанной технологии и составов топлива даст возможность сократить энергозатраты предприятий, потребляющих топливо в локальных системах теплоснабжения, увеличить долю местных видов топлива в энергетическом балансе региона, а также улучшить экологическую обстановку за счет снижения объемов отходов производства и обеспечить экономию природных ресурсов.

ВЫВОДЫ

1. Накопленный исследовательский и производственный опыт переработки нефтесодержащих отходов доказывает перспективность данного направления. В этом случае можно получить значительный энергетический и экономический эффект от совместного использования углеводородсодержащих, древесных, сельскохозяйственных и иных горючих отходов, улучшив при этом экологическую обстановку в местах складирования отходов и создавая твердое топливо с необходимыми энергетическими и физико-химическими свойствами.

2. Комплексное решение проблемы переработки отходов позволяет использовать многие не нашедшие применения в других технологиях отходы

в качестве энергоресурсов, производить альтернативное многокомпонентное топливо с составом, обеспечивающим экологические и энергетические требования для локальных систем теплоснабжения. Кроме того, внедрение разработанной технологии даст возможность сократить энергозатраты предприятий различного назначения, потребляющих топливо, увеличить долю местных видов топлива в энергетическом балансе конкретного региона, а также улучшить экологическую обстановку за счет снижения объемов отходов производства и обеспечить экономию природных ресурсов в целом по республике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталеv, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 122–140. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140.
2. Хрусталеv, Б. М. Многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // *Энергетика и ТЭК*. 2011. № 11. С. 16–19.
3. Способ получения топлива твердого многокомпонентного: пат. 18408 Респ. Беларусь: МПК C10L 5/36, C10L 5/48, C10L 5/06 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv; дата публ.: 30.08.2014.
4. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18463 Респ. Беларусь: МПК C10L 5/04, C10L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv; дата публ.: 30.08.2014.
5. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18130 Респ. Беларусь: МПК C10L 5/44, C10L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv; дата публ.: 30.04.2014.
6. Хрусталеv, Б. М. Энергоэффективное многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // *Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. Т. 1*. Минск: БНТУ, 2013. С. 146.
7. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
8. Хрусталеv, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // *Энергоэффективность*. 2016. № 4. С. 18–22.

Поступила 30.11.2016 Подписана в печать 02.02.2017 Опубликовано онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.*, 59 (2), 122–140 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140.
2. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2011) Multicomponent Solid Fuel on the Basis of Underutilized Waste. *Energetika i TEK* [Power Engineering and Fuel-and-Energy Complex], (11), 16–19 (in Russian).
3. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *A Method of Producing Multi-Component Solid Fuel*. Patent Republic of Belarus No 18408 (in Russian).
4. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *A Composition for Making Briquette of Multi-Component Fuel*. Patent Republic of Belarus No 18463 (in Russian).
5. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *A Composition for Making Briquette of Multi-Component Fuel*. Patent Republic of Belarus No 18130 (in Russian).
6. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2013) Energy Efficient Multi-Component Solid Fuel on the Basis of Underutilized Waste. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy 11 Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 11th International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 146 (in Russian).
7. Yutkin L. A. (1986) *Electrohydraulic Effect and its Application in Industry*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 253 (in Russian).
8. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Composite Solid Propellant Based on Secondary Combustible Waste. *Energoeffektivnost* [Energy Efficiency], (4), 18–22 (in Russian).

Received: 30 November 2016 Accepted: 2 February 2017 Published online: 7 March 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-159-166

УДК 669.02.09

Новые технологии восстановления и защиты энергетического оборудования композитными материалами

А. А. Ищенко¹⁾, В. М. Кравченко¹⁾, Е. В. Дашко¹⁾, Д. Л. Какарека¹⁾

¹⁾Приазовский государственный технический университет (г. Мариуполь, Украина)

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

Реферат. Проведен анализ возможных вариантов восстановления энергетического оборудования и сделан вывод о перспективности выполнения таких работ с помощью композитных материалов. Изложены сведения о технических характеристиках композитных ремонтных материалов различного назначения, приведены результаты ремонтов энергетического оборудования, в частности отработана технология восстановления посадочных поверхностей под диффузорными кольцами и защиты корпусов насосов Д1250. Описана технология восстановления пневмоцилиндра, штока гидроцилиндра, а также уникальная технология восстановления рабочих поверхностей лопаток колеса перекачивающего насоса, которые были полностью сведены коррозией в совокупности с кавитационными процессами и восстановлению традиционными способами не подлежали. Восстановленное колесо отработало один год, и лишь после этого было снято на повторное восстановление. Еще один композитный материал из рассмотренных в статье – диагум – позволил выполнить целую серию ремонтных работ, связанных как с восстановлением обрешеченных поверхностей корпусов насосов, так и с ремонтом различного вида поверхностей транспортерных лент. Учитывая отличные адгезионные свойства данного композита, с его помощью выполнено восстановление изношенных нержавеющей сит грохотов для отсева абразивного материала. Это восстановление выполняли за счет использования отслужившей свой срок транспортерной ленты, которую приклеивали к металлическому сити с помощью диагума. Применение композитов экономически оправдано, поскольку благодаря им сроки восстановительных работ сокращаются, снижается себестоимость ремонтов и вводится в строй оборудование, которое восстановлению не подлежало.

Ключевые слова: корпус насоса, коррозия, кавитация, защита, абразивный износ, лопатки рабочих колес

Для цитирования: Новые технологии восстановления и защиты энергетического оборудования композитными материалами / А. А. Ищенко [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 2. С. 159–166. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-159-166

Адрес для переписки

Ищенко Анатолий Алексеевич
Приазовский государственный
технический университет
ул. Университетская 7,
87500, г. Мариуполь, Донецкая обл., Украина
Тел.: +380 67 943-45-72
ischenko49@mail.ru

Address for correspondence

Ischenko Anatoliy A.
Pryazovskyi State
Technical University
7 Universytetskaya str.,
87500, Mariupol, Donetskaya obl., Ukraine
Tel.: +380 67 943-45-72
ischenko49@mail.ru

New Technologies for Restoration and Protection of Power Equipment with the Aid of Composite Materials

A. O. Ischenko¹⁾, V. M. Kravchenko¹⁾, O. V. Dashko¹⁾, D. V. Kakareka¹⁾

¹⁾Pryazovskyi State Technical University (Mariupol, Ukraine)

Abstract. The analysis of possible variants of reconstruction of the power equipment is fulfilled and the conclusion concerning the prospects of such work with the use of composite materials is reached. The data on the technical characteristics of composite repair materials for various purposes are presented, the results of repairs of power equipment, in particular the technology for the recovery of the boarding surfaces of the diffuser rings and protection of the pumps D1250 casings are provided. The technology of the recovery pneumatic cylinder, hydraulic cylinder rod, as well as the unique technology of restoration of working surfaces of the impeller vanes of transfer pump, that had been destroyed by corrosion in conjunction with the cavitation processes and were considered as not restorable is described. The restored impeller was in operation during a year and only thereafter it was removed for restoration. Another composite material discussed in the article – diagum – makes it possible to perform a series of repairs associated with restoration of the rubber-covered surfaces of pump casings as well as with restoration of various surfaces of the conveyor belts. Taking the excellent adhesive properties of this composite into account, restoration of worn stainless steel sieve screens to remove abrasive material was fulfilled with the aid of it. The restoration was accomplished via the use of the conveyor belt which application time had expired, that was glued to a metal sieve with diagum. The use of the composites is economically justified, because the application of them in repairs reduces, firstly, terms of restoration work and, secondly, the price of repairs. Third, equipment that was damaged beyond repair is being commissioned by the use of the mentioned composites.

Keywords: pump casing, corrosion, cavitation, protection, abrasive wear, blades of impellers

For citation: Ischenko A. O., Kravchenko V. M., Dashko O. V., Kakareka D. V. (2017) New Technologies for Restoration and Protection of Power Equipment with the Aid of Composite Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 60 (2), 159–166. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-159-166 (in Russian)

Введение

В последние годы широкое применение в различных отраслях промышленности при ремонте оборудования находят композитные материалы, представляющие собой разные клеевые соединения на основе эпоксидных смол, полиэфиров, полиуретанов, обогащенные мелкодисперсными металлическими и другими наполнителями. Такие двухкомпонентные композиты обладают хорошими адгезионными свойствами при покрытии металлических поверхностей, что в сочетании с их достаточно высокой прочностью и способностью без усадки переходить за короткий промежуток времени от пластичного состояния к твердому обеспечивает широкую область применения при решении ремонтных проблем. Данная технология получила название молекулярной холодной сварки. Проигрывая обычному сварному соединению в статической прочности, молекулярное соединение обеспечивает высокую циклическую прочность, гладкую поверхность, возможность сочетания крепления с герметизацией, пожаробезопасность и позволяет соединять неоднородные материалы, например черные металлы с неметаллами, цветными металлами и т. п.

Достоинства композитных ремонтных материалов следующие: хорошая адгезия с черными и цветными металлами; близкие к металлам деформационные характеристики; сохранение свойств материалов в достаточно широком температурном диапазоне; хорошая стойкость к воздействию воды, масел, нефтепродуктов, бензина и слабых растворов кислот и щелочей; защита металла от коррозии; диэлектрические свойства; не требуется длительного времени для подготовки поверхности и нанесения; отверждение происходит без избыточного давления и повышенных температур; безвредность для окружающей среды, нетоксичность. Указанные преимущества в сочетании с неплохими прочностными характеристиками материалов позволяют без демонтажа отдельных деталей решать ремонтные задачи, что сокращает простои оборудования и экономит значительные средства.

Анализ исследований и публикаций

Как показал анализ публикаций [1–9], технические характеристики композитов, производимых фирмами «Диамант», «ДорМеталл», «Мультиметалл», «Бета Петрохимия», «Бельзона», «Девкон» и другими, незначительно отличаются друг от друга. Выбор того или иного материала определяется его стоимостью, удобной расфасовкой, простотой применения, достаточно длительным сроком хранения и возможностью приобретения в торговой сети или у представителей указанных фирм.

Из отмеченных производителей ремонтных материалов можно отдать предпочтение немецкой фирме «Диамант» [4–10], имеющей наиболее полную спецификацию материалов, позволяющих решать широкий спектр ремонтных проблем. Это в сочетании с продуманной ценовой политикой и возможностью беспрепятственного их приобретения у представителей фирмы обеспечивает успешное продвижение «Диамант»-продуктов на Украине и в России.

Цель исследований авторов – разработать технологии выполнения ремонтных работ различного оборудования, применяемого в энергетическом хозяйстве.

Примеры выполнения ремонтных работ

На практике имеют место отдельные виды повреждения машин, которые либо не могут быть исправлены традиционными способами, либо требуют больших материальных и временных затрат. Специальными экспериментами и успешными промышленными испытаниями доказано, что с помощью металлополимерных материалов можно не только восстановить, но и увеличить срок службы узлов машин по сравнению с традиционными видами ремонтов. Далее в статье описаны технологические примеры выполнения ремонтных работ, которые основываются на опыте специалистов кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии» Приазовского государственного технического университе-

та (г. Мариуполь), приобретенном при восстановлении работоспособности перекачивающего и энергетического оборудования предприятий Украины.

Прежде всего остановимся на свойствах и особенностях материалов, которые использовались в ремонтах. Технические характеристики основных видов материалов фирмы «Диамант», а также отечественного аналога ДК2, применяемого для выполнения защитных покрытий, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика различных групп металлополимерных материалов
Characteristics of different groups of metal-polymer materials

Материал и его назначение	Технический показатель					Химическая стойкость
	Удельный вес, г/см	Предел прочности на сжатие, МПа (растяжение)	Температуро- стойкость, °С	Время отвердевания, ч	Коэффициент трения по стали	
Пластикметалл – для ремонта дефектов литья, предохранения поверхности металла от коррозии	2,5	140	(–40)–(+200)	1		Масла, вода, щелочи, эмульсии, бензин
Мультиметалл – при восстановлении изношенных деталей машин, насосов, гнезд подшипников, а также для устранения течей и свищей в трубопроводах, работающих под давлением до 25 МПа (250 атм)	2,3	185	(–32)–(+200)	6		Масла, бензин, вода, растворы солей, щелочные растворы
Моглайс – при восстановлении направляющих станков, формировании подшипников скольжения, рабочих поверхностей гидроцилиндров и других пар скольжения	1,7	140	(–40)–(+70) (+125 кратковременно)	24	0,08–0,10	Масла, вода, щелочи, эмульсии, бензин
ДК2 – защитное покрытие корпусов насосов и другого оборудования, подверженного интенсивному износу	1,5	120	(–40)–(+100)	24		Масла, вода, щелочи, эмульсии, кислоты
Диагум – эластомер холодной вулканизации для ремонта резиновых покрытий, транспортных лент и т. д.	1,1	40	(–40)–(+120)	24		Масла, нефть, вода, морская вода, дизтопливо

Примером наиболее эффективного применения композитных материалов является ремонт разбитых опорных поверхностей подшипников качения крупногабаритных корпусов перекачивающих насосов. Основные эта-

пы восстановления гнезд подшипников качения, например насоса Д2000, заключались в следующем. Вначале поверхность гнезда подготавливали к нанесению материала, на что требовалось от 1 до 2 ч. Затем двухкомпонентный материал мультиметалл смешивали и наносили на поверхность гнезда с помощью шпателя. В это время подшипник, формирующий свое гнездо, обрабатывали разделительным составом, который не позволял мультиметаллу прилипнуть к наружной поверхности кольца подшипника. Данные операции занимали 0,5 ч. Затем вал вместе с подшипниками опускали в гнездо на заранее выставленные или напавленные маячки и подшипник затягивали крышкой, излишки материала выдавливались из гнезда. После затвердевания материала (5–6 ч) вал демонтировали, очищали гнездо подшипника от выдавленных излишков мультиметалла и вновь собирали узел. Аналогичным образом восстанавливали в корпусах насосов Д1250 посадочные поверхности под диффузорными кольцами (рис. 1).



Рис. 1. Корпус насоса Д1250 с восстановленными мультиметаллом посадочными поверхностями под диффузорные кольца и защитным химически стойким композитным покрытием

Fig. 1. D1250 pump casing with the boarding surfaces of the diffuser rings recovered with the aid of multimetal and with the protective chemical resistant composite coating

Подобные ремонты выполняли на многих машинах, включая перекачивающие насосы и другие узлы. Таким образом, металлополимерные композиции позволяют продлить срок службы деталей, работающих в условиях вибрационных и динамических нагрузок. Сопоставимая износостойкость этих материалов с износостойкостью стали объясняется тем, что 1,5–2-миллиметровый слой мультиметалла дает возможность (в отличие от стали) более эффективно гасить ударные нагрузки без разрушения самого слоя.

Использование еще одного материала фирмы «Диамант» – моглайса, имеющего хорошие антифрикционные свойства, позволило ряду предприятий решить проблемы ввода в строй агрегатов, которые иным способом

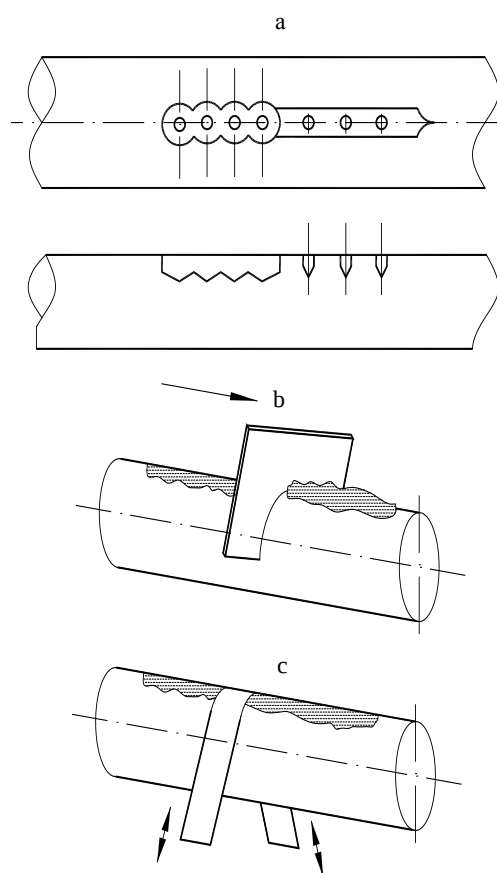


Рис. 2. Восстановление штока гидроцилиндра с царапиной: а – подготовка штока к нанесению мультиметалла; б – формирование поверхности шаблоном; в – доводка восстанавливаемой поверхности наждачной бумагой

Fig. 2. Restoration of the hydraulic cylinder rod from a scratch: a – preparation for the application of the multimetal; b – formation of the surface with the template; c – finishing the restored surface with sandpaper

восстановлению не подлежали. В качестве примера можно привести технологию восстановления внутренней поверхности гидроцилиндра с царапиной на штоках, как показано на рис. 2.

Материал пластикметалл (табл. 1) имеет узкую сферу применения и на многих зарубежных заводах используется для устранения дефектов литья. Учитывая его хорошую сцепляемость с металлами, а также применение в его составе различных металлических наполнителей, включая бронзу, медь, латунь, алюминий и т. д., использование данного материала позволяет исключить переплавку вследствие наличия раковин и трещин деталей из черных и цветных металлов. В нашей практике, учитывая защитные свойства пластикметалла, с его помощью была восстановлена корродирующая внутренняя поверхность пневмоцилиндра. Внутреннюю поверхность цилиндра предварительно подвергали расточке с целью увеличения диаметра на 3 мм. Затем на эту поверхность наносили слой пластикметалла толщиной 3 мм, и после

отвердевания обрабатывали ее до номинального размера. Трехгодичная эксплуатация цилиндра подтверждает возможность исключения аварийных выходов тушильного вагона коксохимзавода из строя по причине заклинивания цилиндра при корродировании его внутренней поверхности.

Еще один материал, разработанный фирмой «Диамант», – диагум – эластомер холодной вулканизации. С его помощью можно успешно восстановить транспортную ленту, поверхности различных обрезиненных корпусов насосов. В проводимых исследованиях авторами использовано свойство диагума прочно соединять резину с металлическими изделиями.

Прочность соединения с помощью диагума, проверенная в лабораторных условиях, значительно превышала прочность соединения деталей с помощью других известных клеевых композиций. Именно это свойство позволило применять его для замены нержавеющей стали на обычную сталь с покрытием транспортной лентой при изготовлении и эксплуатации сит грохотов для отсева различных материалов, в частности угля, на тепловых электростанциях.

Отечественный материал ДК2, который имеет полиуретановую основу и невысокую стоимость, позволяет выполнять защитные покрытия оборудования, применяемого прежде всего в энергетике, например корпуса насосов, поверхности лопаток колес, поверхности задвижек и т. п. Пример восстановления и защиты лопаток насоса от износа приведен на рис. 3.



Рис. 3. Восстановление лопаток перекачивающего насоса

Fig. 3. Recovery of the vanes of the transfer pump

Из рисунка видно, что исходное состояние лопаток колеса насоса вследствие кавитационного, абразивного и коррозионного износов таково, что традиционными способами (наплавкой) восстановить его невозможно. В то же время применение композитного материала ДК2 позволило полностью восстановить геометрию лопаток колеса, как это видно из рис. 3. Восстановленное колесо отработало один год и после этого было снято на повторное восстановление.

ВЫВОД

Композитные материалы фирмы «Диамант» и их отечественные аналоги позволяют эффективно решать большой круг ремонтных проблем в такой области, как энергетика. При этом снижается стоимость ремонтов и повышается срок службы восстановленных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров, А. Б. Композитные материалы для ремонтных работ / А. Б. Гончаров, М. В. Кулагин // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2003. № 9–10. С. 78–83.

2. Полимерная «холодная» сварка. Современные методы ремонта судового оборудования с использованием полимерных материалов / сост. Н. С. Жукова; отв. за вып. Л. И. Штекель. Одесса: Негоциант, 2003. 132 с.
3. Ищенко, А. А. Новые полимерные материалы в практике ремонта промышленного оборудования / А. А. Ищенко // Вестник двигателестроения. 2004. № 3. С. 130–132.
4. Бастиан, В. Опыт по использованию двухкомпонентных материалов для восстановительных ремонтов в прокатных цехах / В. Бастиан // Черные металлы. 1987. № 20. С. 15–16.
5. Рыжов, Н. И. Полимеры и термопластические полиуретанэластомеры в судоремонте / Н. И. Рыжов, А. И. Дурнев // Судостроение и судоремонт. 2004. № 4. С. 27–29.
6. Technology. Boost Mill Life with Expy Grout // Canadian Mining Journal. 1979. Vol. 100, No 3. P. 25.
7. Айхгорн, Ф. Поведение клеевых соединений при старении и длительном нагружении в атмосферных условиях / Ф. Айхгорн, Б. Х. Шмиц // Черные металлы. 1986. № 21. С. 34–36.
8. Szulewski, S. Wykonanie Lub Regeneracja Lozyska Slizgowego Obrabiarki / S. Szulewski // Technologie. 1995. No 5–6. P. 14–17.
9. Badanie Syntetycznych Powlok na Powierzchniach Par Slizgowych / B. Barna [et al.] // Technologia i Automatyzyacja Montazy. 1995. No 2. P. 34–38.
10. Diamant the Metalplastic Company [Electronic Resource]. Available at: <http://diamant-polymer.de/en/>. Date of Access: 25.01.2016.

Поступила 22.04.2016 Подписана в печать 27.06.2016 Опубликовано онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. Goncharov A. B., Kulagin M. V. (2003) Composite Materials for Repair. *Tselluloza. Bumaga. Karton* [Cellulose. Paper. Cardboard], (9–10), 78–83 (in Russian).
2. Zhukova N. S., Shtekel L. I. (2003) *Polymer “Cold” Welding. Modern Methods of Repair of Marine Equipment with the Use of Polymer Materials*. Odessa, Negotsiant. 132 (in Russian).
3. Ischenko A. O. (2004) New Polymer Materials in the Practice of Repairing of Industrial Equipment. *Vestnik Dvigatelyestroyeniya* [Herald of Engine Manufacturing], (3), 130–132 (in Russian).
4. Bastian V. (1987) Experience of the Use of Two-Component Materials for Renewals of Rolling Shops. *Cherniye Metally* [Ferrous Metals], (20), 15–16 (in Russian).
5. Ryzhov N. I., Durnev A. I. (2004) Polymers and Thermoplastic Polyurethane Elastomers in Ship Repair. *Sudostroenie i Sudoremont* [Shipbuilding and Ship Repair], (4), 27–29 (in Russian).
6. Technology. Boost Mill Life with Expy Grout (1979). *Canadian Mining Journal*, 100 (3), 25.
7. Ayhgorn F., Schmitz B. H. (1986) The Behavior of Adhesive Boundings During Aging and Long-Term Loading under Atmospheric Conditions. *Cherniye Metally* [Ferrous Metals], (21), 34–36 (in Russian).
8. Szulewski S. (1995) Wykonanie Lub Regeneracja Lozyska Slizgowego Obrabiarki. *Technologie*, (5–6), 14–17 (in Polish).
9. Barna B., Molnar L., Tokacs D., Towt A. (1995) Badanie Syntetycznych Powlok na Powierzchniach Par Slizgowych. *Technologia i Automatyzyacja Montazy*, (2), 34–38 (in Polish).
10. Diamant the Metalplastic Company. Available at: <http://diamant-polymer.de/en/> (Accessed 25 January 2016).

Received: 22 April 2016

Accepted: 27 June 2016

Published online: 7 March 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-167-175

УДК 621.165

Определение необходимых условий эффективной работы системы шариковой очистки трубок конденсаторов паровой турбины

Часть 1

А. Г. Герасимова¹⁾, А. В. Мальгин²⁾, Ю. Н. Александр³⁾, Е. Н. Крикшина¹⁾

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

²⁾Минская ТЭЦ-4 (Минск, Республика Беларусь),

³⁾ООО «ИСТОК-Энерго» (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Рассмотрено актуальное направление – повышение мощности турбоагрегатов путем улучшения условий теплопередачи в конденсаторах паровых турбин. Проведен анализ микрозагрязнений внутренних поверхностей охлаждающих трубок и влияния загрязненности на процесс теплопередачи в конденсаторах турбин. Изучен существующий способ очистки конденсаторных трубок с помощью пористых эластичных шариков из губчатой резины, который реализован на ряде крупных ТЭЦ и ГРЭС Республики Беларусь. При эксплуатации системы шариковой очистки выявлен существенный недостаток – низкая эффективность данного способа из-за несоблюдения требований по подготовке системы циркуляционного водоснабжения к эксплуатации, а также некоторая степень несовершенства технологии системы шариковой очистки. Одним из условий эффективной работы системы шариковой очистки является определенная степень чистоты трубной системы конденсатора, которая характеризуется коэффициентом чистоты. Для определения эффективности системы шариковой очистки произведена серия опытов по запуску пористых резиновых шариков в трубную систему основных и встроенного пучков турбины Т-250/300-240 УТМЗ. Непосредственно перед опытами проводили гидравлическую очистку трубок конденсатора высоконапорной установкой. В процессе опытов вели учет количества загруженных и отловленных в загрузочной камере пористых резиновых шариков, а также оставшихся в калибровочном устройстве. В результате установлен большой процент невозврата этих шариков, причиной которого является наличие остатков карбонатных отложений, препятствующих движению пористых резиновых шариков в трубках конденсатора. Наличие карбонатных отложений в трубках конденсатора свидетельствует о недостаточной эффективности применяемой противонакипной обработки циркуляционной воды и гидравлического способа очистки трубок конденсатора.

Ключевые слова: конденсаторы паровых турбин, система шариковой очистки, эффективность

Для цитирования: Определение необходимых условий эффективной работы системы шариковой очистки трубок конденсаторов паровой турбины. Часть 1 / А. Г. Герасимова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 167–175. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-167-175

Адрес для переписки

Герасимова Алина Георгиевна
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

Gerasimova Alina G.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosti Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

The Detection of the Necessary Conditions of Effective Functioning of the Ball Cleaning System of the Tubes of Steam Turbine Condensers

Part 1

A. G. Gerasimova¹⁾, A. V. Malgin²⁾, Yu. N. Aleksandr³⁾, Ye. N. Kriksina¹⁾

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

²⁾Minsk Thermal Power Plant-4 (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾“ISTOK-Energo” Limited Liability Company (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A problem of an increase of the power of turbine by improving heat transfer in condensers of steam turbines is considered in the article as a topical one. The analysis of contamination of the internal surfaces of cooling tubes and of the influence of pollution on the process of heat transfer in turbine condensers has been fulfilled. The existing method of cleaning of condenser tubes with the use of porous elastic balls of sponge rubber that is implemented on a number of large thermal power plants and state region power plants of the Republic of Belarus is examined. In the operation of the ball cleaning system a significant drawback has been revealed, viz. a low efficiency of this method due to the failure to comply with preparation the system of circulating water for operation. Also, a certain imperfection of ball cleaning system technology has been determined. One of the prerequisites for the effective functioning of the ball cleaning system is a certain degree of purity of the pipe system of the condenser, characterized by the coefficient of purity. To determine the effectiveness of ball cleaning system a series of experiments on the launching of porous rubber balls in the pipe system of the main and the embedded bunches of the T-250/300-240 UTMZ turbine has been produced. Immediately before the experiments hydraulic cleaning of the tubes of the condenser by a high-pressure installation were carried out. During the experiments, records of the number of downloaded porous rubber balls, of the number of rubber balls captured in a loading chamber, and of the number of rubber balls that remained in a calibration device were kept. A large proportion of default of the balls caused by the presence of residues of the carbonate sediments, that obstruct the movement of porous rubber balls in the tubes of the condenser, was determined. The presence of carbonate deposits in the tubes of the condenser indicates a lack of effectiveness of antiscaling treatment of circulating water and of hydraulic method of cleaning tubes of the condenser.

Keywords: condensers of steam turbines, system of ball cleaning, effectiveness

For citation: Gerasimova A. G., Malgin A. V., Aleksandr Yu. N., Kriksina Ye. N. (2017) The Detection of the Necessary Conditions of Effective Functioning of the Ball Cleaning System of the Tubes of Steam Turbine Condensers. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (2), 167–175. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-167-175 (in Russian)

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется вопросам повышения эффективности выработки электроэнергии на ТЭС и АЭС. Одно из направлений повышения мощности турбоагрегатов – улучшение условий теплопередачи в конденсаторах турбин. Применяемые для охлаждения на электростанциях поверхностные воды содержат растворенные и нерастворенные вещества, которые в зависимости от региона сильно различаются по своему количеству и составу. Нежелательное выпадение этих веществ в виде отложений на внутренних поверхностях охлаждающих труб называется микрозагрязнением. Выделяют несколько типов микрозагрязнений:

- выпадение частиц (седimentация), являющихся взвешенными веществами в охлаждающей воде и осаждающихся на внутренних поверхностях охлаждающих труб теплообменника;

- кристаллизацию (выпадение осадка), происходящую в основном из-за наличия в охлаждающей воде нерастворимых неорганических солей, которые с увеличивающимися тепловыми нагрузками переходят границу растворимости и откладываются в качестве твердых отложений;
- коррозию, возникающую в результате реакции материала труб с охлаждающей водой;
- биологические отложения, являющиеся последствием колонизации трубок различными организмами и отложениями продуктов их обмена веществ.

Микрозагрязнения уменьшают теплопередачу в охлаждающих трубках, а следовательно, существенно снижают эффективность работы конденсатора. В качестве ориентировочных данных для оценки величины потерь на электростанциях по причине микрозагрязнений может служить следующая информация:

- микрозагрязнения повышают тепловой расход турбоустановки на 1–2 %;
- вызванный микрозагрязнениями рост давления в конденсаторе на 10 мбар ведет к потерям в электрической мощности от 0,7 до 1,8 %.

Проводимые ранее исследования трубных систем конденсаторов турбин показали, что наличие органических и шламовых отложений на внутренних поверхностях трубок приводит к питтинговой коррозии и увеличению термического сопротивления стенки трубки. В результате коррозии появляются течи воды в паровое пространство конденсаторов, что ведет к нарушению водно-химического режима основного конденсата и, как следствие, к повышенной нагрузке на ионообменные фильтры [1].

На отечественных ТЭС применяются различные способы периодической очистки внутренней поверхности теплообменных трубок конденсаторов: промывка высоконапорной струей, кислотная промывка, простреливание водовоздушным пистолетом, термическая и вакуумная сушка. Выбор способа очистки зависит от вида отложений и качества циркуляционной воды. Применение этих методов приводит к снижению мощности паровой турбины или даже ее останову, поскольку очистка трубок проводится при частичном или полном удалении воды из конденсатора [2–4].

Кроме того, в период между чистками образующиеся на охлаждаемых поверхностях отложения приводят к постепенному ухудшению вакуума в конденсаторе и пониженной экономичности работы оборудования. Следует отметить также, что периодические очистки трубок конденсаторов связаны с большими затратами средств и весьма трудоемки [3, 4].

Система шариковой очистки трубок конденсаторов

В отличие от периодических методов шариковая очистка – это постоянная автоматизированная, экологически чистая профилактическая очистка, которая производится непосредственно во время работы конденсационной установки и позволяет поддерживать исходную чистоту внутренней поверхности теплообменных трубок [2]. Система шариковой очистки (СШО) нашла широкое применение на отечественных и зарубежных ТЭС. Для очистки трубок конденсаторов в СШО применяются пористые резиновые шарики диаметром, несколько большим внутреннего диаметра теплообменных трубок конденсатора, циркуляция которых позволяет удалять различного рода отложения с внутренней поверхности трубок (рис. 1) [3–7].

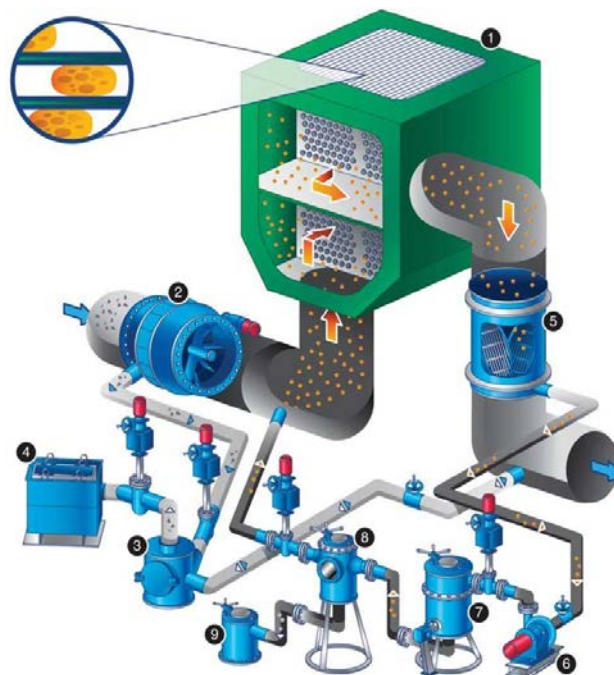


Рис. 1. Оборудование системы шариковой очистки: 1 – конденсатор паровой турбины; 2 – фильтр предварительной очистки; 3 – грязевой фильтр; 4 – бак сбора мусора; 5 – шарикоулавливающее устройство; 6 – насос подачи шариков; 7 – загрузочная камера; 8 – калибрующее устройство; 9 – бак отработавших шариков

Fig. 1. Ball cleaning system equipment: 1 – condenser of the steam turbine; 2 – pre-filter; 3 – mud filter; 4 – waste tank; 5 – ball catching device; 6 – pump for balls delivery; 7 – inlet chamber; 8 – calibration device; 9 – tank for spent balls

Установка очистки конденсаторов шариками из пористой резины, являясь профилактическим экологически чистым средством поддержания в чистоте охлаждающей поверхности трубных систем конденсатора, позволяет:

- снизить фактическое гидравлическое сопротивление системы циркуляционного водоснабжения за счет отсутствия загрязнения трубок и трубных досок конденсатора после установки фильтров предварительной очистки и работы очищающих шариков;
- уменьшить давление пара в конденсаторе турбины при поддержании шариковой очисткой в чистоте охлаждающей поверхности конденсатора;
- снизить ограничение максимальной электрической мощности турбоагрегата из-за ухудшения вакуума в конденсаторе;
- исключить внеплановые остановки блока для очистки охлаждающих трубок с помощью альтернативных периодических методов;
- повысить экологические показатели блока за счет уменьшения выбросов в атмосферу вследствие увеличения КПД блока и исключения неэкологических методов очистки трубок конденсатора;
- исключить питтинговую коррозию охлаждающих трубок под слоем отложений, а также их эрозию из-за попадания крупных загрязнений;
- сократить затраты на ремонт конденсаторов в период плановых остановов;

- повысить надежность блока;
- улучшить качество основного конденсата из-за уменьшения присосов охлаждающей воды и тем самым улучшить водно-химический режим работы блока [6].

Одним из условий эффективной работы системы шариковой очистки является определенная степень чистоты трубной системы конденсатора, которая характеризуется коэффициентом чистоты α . При наличии большого количества отложений на внутренних поверхностях трубок нарушается циркуляция пористых резиновых шариков (ПРШ) в трубках конденсатора. Как правило, для этих целей применяется гидравлическая очистка трубок конденсатора турбины высоконапорной установкой.

Система шариковой очистки применяется на ряде крупных ТЭЦ и ГРЭС Республики Беларусь. Однако в процессе ее эксплуатации, в частности на Минской ТЭЦ-4, был выявлен существенный недостаток – низкая эффективность работы СШО, связанная с нарушением циркуляции ПРШ.

Оценка эффективности работы системы шариковой очистки

Цель выполненной работы – выявление причин, которые приводят к снижению эффективности работы СШО. Исследования проводились в соответствии с методическими указаниями по наладке и эксплуатации СШО конденсаторов паровых турбин [8]. В качестве объекта исследования брали типовую турбину Т-250/300-240 УТМЗ, на которой была установлена рассматриваемая установка. Непосредственно перед опытами закончили гидравлическую очистку трубок конденсатора турбины высоконапорной установкой. Высоконапорный гидравлический способ используется в основном для очистки латунных сетевых подогревателей диаметрами от 16 до 25 мм с отложениями толщиной до 3 мм.

В основу способа положен принцип превращения энергии высокого давления воды, подаваемой в трубку через специальное сопло, в кинетическую энергию потока двигающейся с высокой скоростью на выходе из сопла жидкости. В процессе очистки сопло передвигается в очищаемой трубке. В результате поток отрывает отложения от внутренней поверхности трубки. Основные производители высоконапорных машин – европейские и американские фирмы, например Gardner Denver и General pipe Cleaners (США), Hammelman и Woma (Германия), VHT (Бельгия), Dynajet (Германия).

Для определения эффективности очистки трубок конденсатора произвели серию опытов по запуску ПРШ в трубную систему основных и встроенного пучков турбины Т-250/300-240 УТМЗ. Применяли в основном ПРШ типа СМ (сверхмягкие) и частично типа Н (нормальной твердости). При проведении опытов вели учет количества загруженных и отловленных в загрузочной камере ПРШ, а также оставшихся в калибровочном устройстве.

В ходе первого опыта на передней половине конденсатора из 250 запущенных ПРШ было выловлено 99, схожие результаты получили и на остальных трубных системах пучков. Поэтому вскрыли конденсатор и при помощи продувки трубок сжатым воздухом определили количество застрявших в трубной системе ПРШ. Результаты первого опыта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний системы шариковой очистки. Опыт 1
The test results of ball cleaning system. Experiment 1

Элемент конденсатора	Тип ПРШ	Перепад давления на конденсаторе, кПа	Количество ПРШ, шт.				Невозврат, %
			загруженных	возвратившихся	отработавших	невозвратившихся	
Передняя половина (основной пучок)	Ш90-24СМ	43	250	99	0	151	60,1

При вскрытии передней половины конденсатора выявлено: в первом ходу – три застрявших ПРШ, во втором ходу – 133. С учетом застрявших ПРШ в трубках передней половины конденсатора невозврат ПРШ составил

$$250 - 99 - 3 - 133 = 15 \text{ шт.}$$

Потеря ПРШ в СШО с учетом отловленных и застрявших шариков составила 6 %, что меньше нормативной потери, равной 10 %. Результаты последующих опытов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний системы шариковой очистки. Опыты 2–5
The test results of ball cleaning system. Experiments 2–5

Элемент конденсатора	Тип ПРШ	Перепад давления на конденсаторе, кПа	Количество ПРШ, шт.				Невозврат, %
			загруженных	возвратившихся	отработавших	невозвратившихся	
Опыт 2							
Передняя половина (основной пучок)	Ш90-24СМ	69	300	50	2	248	
	Ш90-24СМ	67	100	167	0	−67	
Итого			400	217	2	181	45,5
Опыт 3							
Задняя половина (основной пучок)	Ш90-24СМ	63	250	165	0	85	34
Опыт 4							
Встроенный пучок	Ш90-24СМ	42	190	145	4	41	21,6
Опыт 5							
Встроенный пучок	Ш90-24СМ	47	150	116	3	31	20,7
	Ш90-24Н		150	14	0	136	90,7
Итого			300	130	3	167	55,7

В результате проведенных работ определено, что в среднем процент невозврата ПРШ для передней половины конденсатора составлял при-

мерно 45 %, задней половины ~34 % и встроенного пучка – около 21 %. При подаче во встроенный пучок конденсатора ПРШ нормальной твердости невозврат значительно вырос и составил 91 %. Согласно инструкции по эксплуатации СШО и РД невозврат ПРШ должен составлять до 10 %.

Основной причиной невозврата ПРШ является наличие остатков карбонатных отложений, которые препятствуют движению ПРШ в трубках конденсатора. Это подтверждается тем, что процент невозврата сверхмягких ПРШ во встроенном пучке в опыте 5 составляет примерно ту же величину, что и в опыте 4 (21,6 %), а более плотные ПРШ нормальной твердости практически все задержались в трубках конденсатора.

Также было извлечено по одной трубке из первого и второго ходов передней половины основного пучка конденсатора. По результатам исследования извлеченных трубок выявлено, что трубка первого хода полностью очищена от отложений до металла за исключением входных и выходных участков длиной примерно по 3–5 см. Среднее остаточное количество отложений составляло 5 г/м². Трубка второго хода конденсатора очищена полностью только на расстоянии 328 см от входа воды (за исключением непосредственно самого входного участка длиной 3 см), и остаточное количество отложений на этом участке составляло 4 г/м². Далее по длине трубки, на расстоянии 1,7 м, она была очищена частично: остаточное количество отложений 455 г/м². На следующем участке трубки длиной 3,62 м присутствовал налет отложений по всей внутренней поверхности трубки (толщиной от 1,0 мм и более): остаточное количество отложений на этом участке 1350 г/м². Среднее остаточное количество отложений внутри трубки второго хода составляло 792 г/м², что значительно превышало остаточную загрязненность для условно чистой поверхности теплообменников, которая согласно СТП 09110.37.409–09 [9] должна быть не более 100 г/м².

Плотно прилегающие отложения накипи к трубкам конденсатора трудно поддаются гидравлической очистке с помощью высоконапорной установки. Более интенсивная очистка таких участков данным методом может привести к повреждению и преждевременному износу трубок конденсатора [10]. Наличие твердых отложений накипи в трубках конденсатора и периодические очистки этих трубок от накипи (примерно один раз в год) свидетельствуют о недостаточной эффективности применяемой противонакипной обработки циркуляционной воды [11].

ВЫВОДЫ

1. Система шариковой очистки не предназначена для очистки загрязненных трубок конденсатора, а является лишь превентивным методом против отложений.

2. Для обеспечения необходимой циркуляции пористых резиновых шариков в системе шариковой очистки необходимо, чтобы внутренняя поверхность трубок была чистой и гладкой по всей длине, включая участки на входе и выходе воды, а также отсутствовали отдельные очаги отложений на ней. Поэтому при несоблюдении требований по противонакипной обработке циркуляционной воды (что нередко происходит на отечественных станциях) следует выполнить высококачественную очистку основного и встроенного пучков конденсатора.

3. Традиционно используемый механический вид очистки карбонатных отложений не позволяет достичь необходимой чистоты трубок без их повреждения, поэтому наиболее эффективным мероприятием перед вводом в эксплуатацию системы шариковой очистки являются химическая очистка трубок конденсатора (обязательное применение химвеществ с минимальной коррозионной агрессивностью) и последующая доочистка внутренних поверхностей от твердых отложений накипи высоконапорной гидравлической установкой.

4. Для защиты поверхностей водоводов, входных камер, трубных досок конденсатора от коррозии, снижения износа шариков и улучшения их входа в трубки целесообразно использовать антикоррозионное полимерное покрытие [12–14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы очистки от накипи [Электронный ресурс] // ЗевсТрубопровод. Режим доступа: <http://www.zevs-irp.ru/methods>. Дата доступа: 04.05.2015.
2. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Автоматизированная система шариковой очистки конденсатора турбины Т-180/210-130 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. Н. Унукович // Энергоэффективность. 2004. № 8. С. 5–7.
3. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Создание и эффективность автоматической системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ. Ч. 1 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, А. Ю. Наумов, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 3. С. 76–84.
4. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Опыт и результаты работы демонстрационной зоны высокой энергетической эффективности филиала «Гомельская ТЭЦ-2» РУП «Гомельэнерго» / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский // Энергоэффективность. 2006. № 8. С. 6–7.
5. Техническое описание системы шариковой очистки и фильтра предварительной очистки (Ленинградская АЭС): инв. № 2ТО-241, 2006 г.
6. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Создание и эффективность автоматической системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ. Ч. 2 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, А. Ю. Наумов, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 4. С. 74–85.
7. Субботин, В. Г. Паровые турбины для ОАО «Турбоатом» для тепловых электростанций / В. Г. Субботин, Е. В. Левченко, В. Л. Швецов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2009. № 3. С. 6–17.
8. Методические указания по наладке и эксплуатации систем шариковой очистки конденсаторов паровых турбин: РД 34.30.403–93. М.: Служба передового опыта ОРГЭС, 1994. 46 с.
9. Проведение механических и химических очисток теплообменников: СТП 09110.37.409–09. Режим доступа: http://energodoc.by/data/pdf/3222_3e63.pdf. Дата доступа: 07.05.2015.
10. Балтаханов, А. М. Электрогидроимпульсная технология очистки труб от накипи и отложений / А. М. Балтаханов, Е. Н. Иванов, В. К. Касаткин. М.: Научтехлитиздат, 2013. 120 с.
11. Тумановский, А. Г. Эффективность использования системы шариковой очистки конденсаторов паровой турбины / А. Г. Тумановский, Ю. Г. Иванов, Н. В. Болдырев // Новости теплоснабжения. 2011. № 7 (131). С. 29–32.
12. Методические указания по прогнозированию химического состава и накипееобразующих свойств охлаждающей воды электростанций: РД 34.37.307–87. М.: Союзтехэнерго, 1989. 40 с.
13. Оригинальные системы защитного и ремонтного покрытия Plastocor® от эрозии и коррозии на конденсаторах, теплообменниках и всей системе водяного охлаждения. Режим доступа: <http://www.plastocor-international.com/ru>. Дата доступа: 25.05.2015.
14. Антикоррозионные покрытия. Покрытия Scotchkote®. Режим доступа: http://solutions.3mrussia.ru/wps/portal/3M/ru_RU/Corrosion_Protection/Coatings/. Дата доступа: 25.05.2015.

Поступила 17.05.2016 Подписана в печать 21.07.2016 Опубликовано онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. Methods of Descaling. *Zeus Pipeline* [ZevsTruboprovod]. Available at: <http://www.zevs-irp.ru/methods>. (Accessed 4 May 2015) (in Russian).
2. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A., Unukovich Yu. N. (2004) Automated System of Ball Cleaning of Turbine T-180/210-130 Condenser. *Energoeffektivnost* [Energy Efficiency], (8), 5–7 (in Russian).
3. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A., Naumov A. Yu., Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya A. Yu. (2015) Designing and Efficiency Effect of Automatic Ball-Cleaning System for Condenser 180-KTsS-1 of Turbine T-180/210-130-1 LMZ. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (3), 76–84 (in Russian).
4. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A. (2006) The Experience and Results of Work of the Demonstration Zone of High Energy Efficiency Branch “Gomel CHP-2” of the “Gomelenergo” Republican Unitary Enterprise. *Energoeffektivnost* [Energy Efficiency], (8), 6–7 (in Russian).
5. Technical Details of Ball Cleaning System and Pre-Filter (Leningrad NPP): inv. No 2TO-241, 2006 (in Russian, unpublished).
6. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A., Naumov A. Yu., Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya A. Yu. (2015) Designing and Efficiency Effect of Automatic Ball-Cleaning System for Condenser 180-KTsS-1 of Turbine T-180/210-130-1 LMZ. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (4), 74–85 (in Russian).
7. Subbotin V. G., Levchenko Ye. V., Shvetsov V. L. (2009) Steam Turbines for OJSC “Turboatom” for Thermal Power Plants. *Energeticheskiye i Teplotekhnicheskiye Protsessy i Oborudovaniye* [Energy and Thermal Engineering Processes and Equipment], (3), 6–17 (in Russian).
8. Guidance Document 34.30.403–93. Guidelines for the Commissioning and Operation of the Ball Cleaning System of Steam Turbine Condensers. Moscow, ORGRES Service of Excellence. 46 (in Russian).
9. Enterprise Standard 09110.37.409–09. The Mechanical and Chemical Cleaning of Heat Exchangers. Available at: http://energodoc.by/data/pdf/3222_3e63.pdf. (Accessed 7 May 2015) (in Russian).
10. Baltakhanov A. M., Ivanov Ye. N., Kasatkin V. K. (2013) *Electrohydropulse Technology of Cleaning of Pipes from Scale and Deposits*. Moscow, Nauchtekhizdat Publ. 120 (in Russian).
11. Tumanovsky A. G., Ivanov Yu. G., Boldyrev N. V. (2011) The Effectiveness of the Use of the Ball Cleaning System of Steam Turbine Condensers. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], 131 (7), 29–32 (in Russian).
12. Guidance Document 34.37.307–87. Methodological Guidelines for Forecasting the Chemical Composition and Scale-Forming Properties of the Cooling Water of Power Stations. Moscow, Soiuztekhnenergo, 1989. 40 (in Russian).
13. The Original System of Protective (from Erosion and Corrosion in Condensers, Heat Exchangers and the Entire Cooling System) as well as Repair Coatings of Plastocor®. *Plastocor International*. Available at: <http://www.plastocor-international.com/ru>. (Accessed 25 May 2015) (in Russian).
14. Anti-Corrosion Coatings. *Coatings of Scotchkote®*. Available at: http://solutions.3mrussia.ru/wps/portal/3M/ru_RU/Corrosion_Protection/Coatigs/. (Accessed 25 May 2015) (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-176-186

УДК 697.112.3; 536.2

Решение задачи использования подземной воды для охлаждения животноводческих помещений

Тхай Нгок Шон¹⁾, Во Ти Тинь¹⁾

¹⁾Политехнический институт Данангского университета (Дананг, Социалистическая Республика Вьетнам)

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

Реферат. Температура наружного воздуха в Центральной части Вьетнама в летнее время может достигать 32–35 °С, в некоторых местах – выше 42 °С. Такие температуры сильно влияют на общее состояние домашних животных, сопровождающееся изменением продуктивности: снижением привеса животных, выращиваемых на мясо, у птиц уменьшением яйценоскости и пр. Для устранения указанных негативных явлений необходимо охлаждение или кондиционирование воздуха в животноводческих помещениях. Существует несколько способов их охлаждения, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками. В статье рассматривается использование подземных вод, имеющих температуру 24–25 °С, для охлаждения животноводческих помещений. Один из методов – разбрызгивание воды на крыше здания. При расчете количества теплоты, отводимой от воздуха внутри помещения, в первом приближении считают, что оно определяется главным образом теплопередачей от воздуха внутри помещения охлаждающей воде через поверхность части кровли, представленной нижней частью волны, образующей поверхность металлочерепицы. В этом случае влиянием верхней части волны, образованной поверхностью металлочерепицы, на теплопередачу пренебрегают. Однако такое упрощение модели приводит к ошибкам. Предложено аналитическое решение задачи охлаждения воздуха в помещении путем орошения подземной водой наружной поверхности кровли. Рассмотрена задача теплопроводности в ребре конечной длины постоянного поперечного сечения, у которого различные стороны поверхности ребра сопрягаются с разными средами. Кроме того, в расчете учитывается влияние солнечного излучения. Решение проводили с помощью дифференциального уравнения, записанного на основе теплового баланса для любого бесконечно малого элемента ребра, находящегося в стационарном режиме. Полученные зависимости использованы для расчета практической задачи орошения грунтовой водой крыши из металлочерепицы помещений для содержания животных.

Ключевые слова: охлаждение помещения, подземная вода, теплопроводность, металлочерепица, солнечное излучение

Для цитирования: Шон, Тхай Нгок. Решение задачи использования подземной воды для охлаждения животноводческих помещений / Тхай Нгок Шон, Во Ти Тинь // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 2. С. 176–186. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-176-186

Адрес для переписки
Шон Тхай Нгок
Политехнический институт
Данангского университета
ул. Ледуан, 41,
г. Дананг, Вьетнам
Тел.: 84 511 382-20-41
webmaster@ud.edu.vn

Address for correspondence
Shon Thay Ngok
Polytechnic Institute
of Da Nang University
41 Leduan str.,
Da Nang, Vietnam
Tel.: 84 511 382-20-41
webmaster@ud.edu.vn

The Solution to the Problem of Using Ground Water to Cool Livestock Buildings

Thay Ngok Shon, Vo Ti Tin

¹⁾Polytechnic Institute of Da Nang University (Da Nang, Socialist Republic of Vietnam)

Abstract. Ambient temperature in the central part of Vietnam in summer can reach 32–35 °C; in some places it can be more than 42 °C. Hot climate strongly affects the animal organism alongside with the animal weight reduction and reduction the quantity of egg-laying in poultry. Therefore, air conditioning in livestock buildings is necessary. There are several ways to cool the temperature in such buildings, and each one has its own advantages and disadvantages. We propose to use underground water at the temperature of 24–25 °C for this purpose. One of the methods of cooling sheds for livestock is sprinkler irrigation of water on the roof. For calculating the amount of heat, removed from the indoor air in the shed to the cooling water, in the first approximation specialists believe in some cases that an appropriate amount of heat being removed is determined mainly by heat transfer from the air inside the shed to the cooling water through the surface of the roof, represented by the lower part of the wave that form the surface of a metal tile, neglecting the influence of heat conduction on top of the wave of the tile surface. Consequentially, such a simplification leads to possible errors. Therefore, the authors solved the problem of cooling shed by irrigation of water on the roof by an analytical method. Specifically, we solved the problem of heat conductivity of the fin of the finite length of constant cross section, wherein different sides of the fin are conjugate with different environments. Additionally, the calculation considered the effect of solar radiation. For this purpose, the authors have created a heat balance equation at steady state for any infinitesimal element of the fin, and solved the differential equation afterwards. The authors applied the results for calculating practical problem of ground water irrigation of a roof of a livestock shed made of metal areas tiles.

Key words: air conditioning, underground water, heat conduction, metal roof tile, solar radiation

For citation: Shon Thay Ngok, Tin Vo Ti (2017) The Solution to the Problem of Using Ground Water to Cool Livestock Buildings. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (2), 176–186. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-176-186 (in Russian)

Введение

Во Вьетнаме, особенно в центральной части, в летнее время температура наружного воздуха высока. Обозначим: среднюю температуру в зоне между провинциями Нгеана и Биньдиня в июне–июле обычно находится в пределах 34–35 °C, достигая в отдельные периоды 42 °C [1]. Это определяет острую потребность в охлаждении не только людей в повседневной жизни, но и сельскохозяйственных животных. Использование систем кондиционирования воздуха для обеспечения жизнедеятельности людей общепризнано, однако для животных применение традиционного кондиционирования экономически нецелесообразно, поскольку требуются значительные инвестиции и высокие эксплуатационные затраты. В то же время в Центральной части Вьетнама, в Дананге и Куаннаме имеются большие запасы подземной воды с относительно низкой температурой (24–26 °C) [2, 3]. Очевидно, что она может использоваться для охлаждения животноводческих помещений. Один из простых способов заключается в орошении водой кровли, которая в секторе животноводства Вьетнама выполняется, как правило, из металлочерепицы, и при этом отсутствуют потолочные пере-

крытия [4, 5]. Вода стекает по нижней волне металлочерепицы, нагревается в результате передачи теплоты от нагретой кровли и от воздуха внутри помещения, частично блокируя солнечное излучение. Очевидно, часть потока воды на кровле нагревается контактирующим наружным воздухом, а часть – верхней поверхностью волны металлочерепицы в результате теплопроводности самой черепицы. Последний процесс можно классифицировать как теплопроводность в ребре постоянного поперечного сечения. В данной статье рассматривается расчет температурного поля верхней части волны металлочерепицы и потока теплоты, передаваемой от воздушной среды внутри помещения охлаждающей воде.

Задача охлаждения помещения методом орошения водой крыши из металлочерепицы

Рассмотрим типовую металлочерепицу с размерами, приведенными на рис. 1.

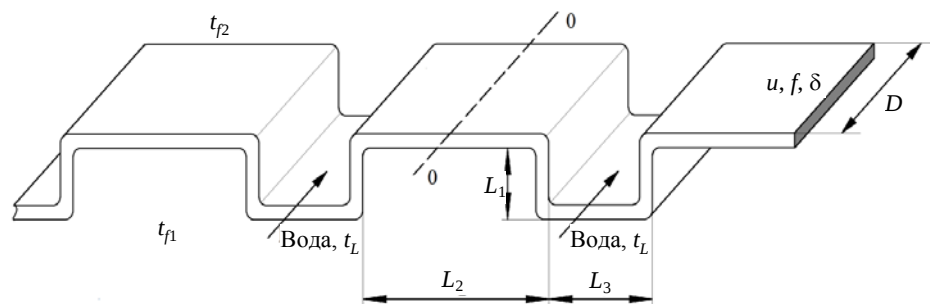


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции металлочерепицы кровли животноводческого помещения

Fig. 1. Schematic diagram of the structure of metal tile roof of a livestock shed

Вода, разбрызгиваемая на поверхности кровли, стекает по нижней образующей волны металлочерепицы. Обозначим: среднюю температуру воды t_L , температуру воздуха внутри помещения t_{f1} , температуру наружного воздуха t_{f2} . Коэффициенты теплоотдачи от воздуха к внутренней α_1 и наружной α_2 сторонам поверхности кровли принимаются постоянными. Известны плотность потока излучения Солнца E и коэффициент поглощения металлочерепицы A . Стоит задача определения теплоты, переданной от воздуха внутри помещения охлаждающей воде, разбрызгиваемой на поверхности кровли.

В расчетах принимали, что количество теплоты, поступающей от воздуха внутри помещения к охлаждающей воде, в основном передается через нижнюю образующую волны металлочерепицы. В этом случае влиянием теплопередачи через верхнюю образующую волны пренебрегали. Однако это может привести к неприемлемым ошибкам.

Для более точного решения задачи необходимо учитывать распределение температуры на верхней образующей волны металлочерепицы.

В предположении, что скорость стекания воды в канавках металлочерепицы одинакова и одинакова средняя температура потока, температурное поле верхней части волны металлочерепицы можно принимать симметричным, а ось симметрии считать за начало координат. В результате получаем особый случай задачи теплопроводности в ребре постоянного поперечного сечения. Принимаем, что вода заполняет канавку металлочерепицы до половины паза, в этом случае длина ребра составляет $L = 0,5(L_1 + L_2)$. В классической задаче теплопроводности в ребре постоянного поперечного сечения обе теплопередающие поверхности омываются одной средой [6, 7]. В данном случае различные поверхности ребра, участвующие в теплопередаче, омываются разными средами: воздухом на внутренней, водой на наружной поверхности. Кроме того, существенное влияние оказывает излучение Солнца, которое необходимо учитывать. Схема предлагаемой модели показана на рис. 2.

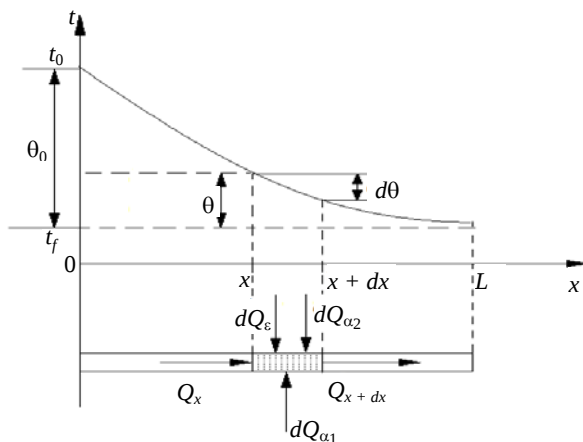


Рис. 2. Схема модели к решению задачи теплопроводности внутри ребра

Fig. 2. The model scheme to the solution of the problem of heat conduction inside the fin

Температурное поле верхней части волны металлочерепицы

Для любого элементарного объема верхней волны металлочерепицы уравнение теплового баланса для стационарного режима может быть записано

$$Q_x + dQ_{\alpha1} + dQ_{\alpha2} + dQ_{\epsilon} = Q_{x+dx}, \quad (1)$$

где Q_x – количество теплоты, поступающей в элемент за единицу времени; Q_{x+dx} – то же, отводимой из элемента за единицу времени; $dQ_{\alpha1}$ – то же, отдаваемой воздухом внутри помещения от нижней поверхности элемента за единицу времени; $dQ_{\alpha2}$ – то же, поступающей от наружного воздуха к поверхности верхней части волны элемента за единицу времени; dQ_{ϵ} – то же,

поступающей к верхней стороне элемента за счет излучения Солнца в единицу времени.

Количество теплоты, поступающей в элемент и отводимой от него, определяется из закона Фурье:

$$Q_x = -\lambda f \frac{dt}{dx}; \quad (2)$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda f \frac{d}{dx} \left(t + \frac{dt}{dx} dx \right) = -\lambda f \frac{dt}{dx} - \lambda f \frac{d^2 t}{dx^2} dx, \quad (3)$$

где λ — коэффициент теплопроводности металлочерепицы, Вт/(м·К); f — площадь поперечного сечения ребра, м².

Количество теплоты, отдаваемой воздухом с внутренней и внешней сторон элемента кровли наружному воздуху, определяется в соответствии с законом Ньютона. Толщина листа металлочерепицы δ несоизмеримо мала в сравнении с периметром поперечного сечения ребра u . Принимая длину листа металлочерепицы $u/2$, можно записать:

$$dQ_{\alpha 1} = \frac{u}{2} dx \alpha_1 (t_{f1} - t); \quad (4)$$

$$dQ_{\alpha 2} = \frac{u}{2} dx \alpha_2 (t_{f2} - t). \quad (5)$$

Обозначим

$$dQ_{\alpha} \triangleq dQ_{\alpha 1} + dQ_{\alpha 2}. \quad (6)$$

После преобразования получаем

$$dQ_{\alpha} = u \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} dx \left(\frac{t_{f1} \alpha_1 + t_{f2} \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} - t \right). \quad (7)$$

Обозначив:

$$\alpha \triangleq \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2};$$

$$t_f \triangleq \frac{t_{f1} \alpha_1 + t_{f2} \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2},$$

получаем

$$dQ_{\alpha} = \alpha u (t_f - t) dx.$$

Количество теплоты, поступающей с солнечным излучением Солнца к верхней стороне элемента, определяется

$$dQ_{\varepsilon} = AE \frac{u}{2} dx,$$

где E – плотность потока излучения Солнца, зависящая от рассматриваемого промежутка времени года и местоположения, Вт/м².

Подставляя выражения (2), (3) и (6) в (1), после преобразования получаем

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{\alpha u}{\lambda f} (t - t_f) = -\frac{1}{2} \frac{AEu}{\lambda f}. \quad (8)$$

Обозначим:

$$\beta \triangleq \sqrt{\frac{\alpha u}{\lambda f}} \text{ [м}^{-1}\text{]}; \quad \theta \triangleq t - t_f; \quad a \triangleq -\frac{1}{2} \frac{AEu}{\lambda f} \text{ [Км}^{-2}\text{]}.$$

Получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - \beta^2 \theta = a. \quad (9)$$

Решение дифференциального уравнения имеет вид

$$\theta = C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} + \theta_{\varepsilon}, \quad (10)$$

где $\theta_{\varepsilon} \triangleq -\frac{a}{\beta^2} \text{ [К]},$ или $\theta_{\varepsilon} = \frac{1}{2} \frac{AE}{\alpha}.$

Постоянные C_1, C_2 определяются из граничных условий: при $x = 0$:

$$-\lambda f \frac{dt}{dx} \Big|_{x=0} = 0; \quad -\lambda f \beta (C_1 - C_2) = 0; \quad C_1 = C_2;$$

при $x = L$

$$\theta_L = C_1 e^{\beta L} + C_2 e^{-\beta L} + \theta_{\varepsilon}. \quad (11)$$

Получаем

$$C_1 = C_2 = \frac{\theta_L - \theta_{\varepsilon}}{e^{\beta L} + e^{-\beta L}}.$$

Подставляя C_1, C_2 в (10), после преобразования находим

$$\theta = (\theta_L - \theta_{\varepsilon}) \frac{\text{ch}(\beta x)}{\text{ch}(\beta L)} + \theta_{\varepsilon}. \quad (12)$$

Температурное поле на верхней стороне волны металлочерепицы имеет вид

$$t = t_f + \left(t_L - t_f - \frac{1}{2} \frac{AE}{\alpha} \right) \frac{\operatorname{ch}(\beta x)}{\operatorname{ch}(\beta L)} + \frac{1}{2} \frac{AE}{\alpha}. \quad (13)$$

В особом случае, когда можно пренебречь влиянием солнечного излучения ($\theta_\varepsilon = 0$), выражение (12) трансформируется к виду

$$\theta = \theta_L \frac{\operatorname{ch}(\beta x)}{\operatorname{ch}(\beta L)}. \quad (14)$$

Если не различать среды верхней и нижней поверхностей металлочерепицы, т. е. когда имеет место $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, $t_{f1} = t_{f2} = t_f$, то следует, что (14) является зависимостью для расчета избыточной температуры в ребре постоянного поперечного сечения [6–8]. Отличие имеет место лишь в начале отсчета координат.

Количество теплоты, переданной от воздуха внутри помещения охлаждающей воде

Количество теплоты, полученной охлаждающей водой Q , зависит от двух слагаемых: Q_1 – теплоты, переданной от воздуха внутри помещения охлаждающей воде через нижнюю поверхность волны металлочерепицы, и Q_2 – теплоты, переданной от воздуха внутри помещения внутренней стороне верхней волны металлочерепицы:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (15)$$

Количество теплоты Q_1 определяется следующим образом. Поскольку коэффициент теплоотдачи от поверхности металлочерепицы к воде значительно больше (на два порядка) коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности металлочерепицы, можно принимать, что температура поверхности металлочерепицы равна температуре воды. Тогда значение Q_1 определяется из закона Ньютона

$$Q_1 = \alpha_1 F_1 (t_{f1} - t_L), \quad (16)$$

где F_1 – площадь поверхности волны металлочерепицы, омываемая водой, м^2 .

Поскольку температура верхней стороны волны металлочерепицы зависит от координат, согласно выражению (13), количество теплоты Q_2 определяется следующим образом:

$$Q_2 = \int_0^{F_2} \alpha_1 (t_{f1} - t) dF. \quad (17)$$

Преобразуем последнее выражение

$$t_{f1} - t = (t_{f1} - t_f) - (t - t_f).$$

Обозначив

$$\theta_{f1} \triangleq (t_{f1} - t_f),$$

получаем:

$$t_{f1} - t = \theta_{f1} - \theta; \quad dF = \frac{1}{2} u dx; \quad Q_2 = \int_0^L \alpha_1 (\theta_{f1} - \theta) \frac{1}{2} u dx.$$

После решения и преобразования имеем выражение

$$Q_2 = \alpha_1 F_2 [(\theta_\varepsilon - \theta_L) \eta_c - (\theta_\varepsilon - \theta_{f1})], \quad (18)$$

где F_2 – площадь поверхности волны металлочерепицы, несприкасающаяся с водой, м²; η_c – коэффициент эффективности ребра, определяемый по формуле

$$\eta_c = \frac{\text{th}(\beta L)}{\beta L}.$$

Подставив (16) и (18) в (15), получим количество теплоты, переданной от воздуха внутри помещения охлаждающей воде.

Пример расчета

Пример расчета связан с практической задачей охлаждения помещения для содержания животных путем орошения грунтовой водой крыши из металлочерепицы. Размеры помещения и кровли из металлочерепицы определяются по данным [3], температура воздуха внутри помещения выбирается в зависимости от конкретных видов животных, коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности крыши принимается с учетом конкретных условий по [9, 10]. Характеристики для примера расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование характеристики	Обозначение/формула	Значение
Количество листов металлочерепицы	N	30
Количество волн на листе металлочерепицы	n_r	10
Высота волны, м	L_1	0,02
Длина верха волны, м	L_2	0,06
Длина низа волны, м	L_3	0,04
Длина листа металлочерепицы, м	D	3,0
Толщина листа металлочерепицы, м	δ	0,001

Продолжение табл. 1

Наименование характеристики	Обозначение/формула	Значение
Длина ребра, м	$L = 0,5(L_1 + L_2)$	0,04
Коэффициент теплопроводности металлочерепицы, Вт/(м·К)	λ	50
Коэффициент теплоотдачи от воздуха к внутренней стороне кровли, Вт/(м ² ·К)	α_1	11
Коэффициент теплоотдачи от воздуха к наружной стороне кровли, Вт/(м ² ·К)	α_2	7
Температура воздуха внутри помещения, °С	t_{f1}	30
Температура наружного воздуха, °С	t_{f2}	36
Коэффициент поглощения металлочерепицы	A	0,6
Плотность потока излучения Солнца, Вт/м ²	E	600
Средняя температура воды, °С	t_L	25
Площадь поверхности волны металлочерепицы, соприкасающаяся с водой, м ²	$F_1 = D \left(2 \frac{L_1}{2} + L_3 \right)$	0,18
Площадь поверхности волны металлочерепицы, не соприкасающаяся с водой, м ²	$F_2 = 2LD$	0,24
Периметр поперечного сечения ребра, м	$u = 2(D + \delta)$	6,002
Площадь поперечного сечения ребра, м ²	$f = \delta D$	0,003
Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$	9,0
Приведенная температура среды, °С	$t_f = \frac{t_{f1}\alpha_1 + t_{f2}\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$	32,3
Характеристический коэффициент ребра	$\beta = \sqrt{\frac{\alpha u}{\lambda f}}$	19,0
Избыточная температура θ_ε , °С	$\theta_\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{AE}{\alpha}$	20
Избыточная температура θ_L , °С	$\theta_L = t_L - t_f$	-7,3
Избыточная температура θ_{f1} , °С	$\theta_{f1} = t_{f1} - t_f$	-2,3
Коэффициент эффективности ребра	$\eta_c = \frac{\text{th}(\beta L)}{\beta L}$	0,84
Мощность потока теплоты, переданной от воздуха внутри помещения охлаждающей воде через нижнюю поверхность волны металлочерепицы, Вт	$Q_1 = \alpha_1 F_1 (t_{f1} - t_L)$	9,90
Мощность потока теплоты, переданной от воздуха внутри помещения внутренней стороне волны металлочерепицы, Вт	$Q_2 = \alpha_1 F_2 [(\theta_\varepsilon - \theta_L)\eta_c - (\theta_\varepsilon - \theta_{f1})]$	1,93

Окончание табл. 1

Наименование характеристики	Обозначение/формула	Значение
Мощность потока теплоты, переданной от воздуха внутри помещения охлаждающей воде, Вт	$Q = Q_1 + Q_2$	11,83
Мощность потока теплоты, переданной от воздуха внутри помещения охлаждающей воде, Вт, относительно всей кровли	$Q_m = Nn_r Q$	3549
Процентное отношение η_{Q1}	$\eta_{Q1} = \frac{Q_2}{Q_1} 100$	19,5
Процентное отношение η_Q	$\eta_Q = \frac{Q_2}{Q} 100$	16,3

ВЫВОДЫ

1. Предлагается решение задачи теплопроводности в ребре постоянного поперечного сечения с условиями, которые несколько шире классической постановки задачи: во-первых, поверхности ребер омываются различными средами, во-вторых, одна поверхность находится под влиянием солнечного излучения. Из полученных результатов можно решить классическую задачу теплопроводности в ребре постоянного поперечного сечения конечной длины.

2. Выведенные зависимости использованы для расчета практической задачи охлаждения предназначенных для содержания животных помещений, не имеющих потолочного перекрытия. Охлаждение обеспечивается с помощью артезианской воды, которой орошается наружная поверхность кровли из металлочерепицы. Количество теплоты, переданной от воздуха внутри помещений через нижнюю поверхность ребер металлочерепицы, составляет 19,5 % теплоты, переданной охлаждающей воде через поверхность нижней волны металлочерепицы, что составляет 16,3 % общего количества теплоты, переданной охлаждающей воде. Это означает, что нельзя пренебречь процессом теплопроводности через верхнюю волну металлочерепицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. QСХDVN 02:2008/BXD: Вьетнамский строительный кодекс. Естественные физические и климатические данные для строительства. Ханой, 2000. 322 с.
2. Хай, Фам Нгок. Техника добычи подземной воды / Фам Нгок Хай, Фам Вьет Ха. Ханой: Сельское хозяйство, 2004. 158 с. (на вьетнамском языке).
3. Хиеу, Динь Дык. Исследование возможности использования подземной воды для охлаждения сарая для животных в Центральной части Вьетнама / Динь Дык Хиеу. Дананг: Данангский ун-т, 2014. 101 с.

4. Животноводство / Нгуен Зуй Хоан [и др.]. Ханой: Сельское хозяйство, 1999. 150 с. (на вьетнамском языке).
5. Фьонг, Нгуен Чунг. Руководство по животноводству / Нгуен Чун Фьонг. Ханой: Сельское хозяйство, 2013. 63 с. (на вьетнамском языке).
6. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. М.: Энергоиздат, 1981. 418 с.
7. Тьин, Хоанг Динь. Теплопередача и теплообменники / Хоанг Динь Тьин. Ханой: Наука и техника. 2001. 582 с. (на вьетнамском языке).
8. Bejan, A. Heat Transfer Handbook / A. Bejan, A. D. Kraus. Wiley, 2003. 1496 с.
9. Тинь, Во Ти. Кондиционирование воздуха / Во Ти Тинь. Ханой: Наука и техника, 2005. 490 с. (на вьетнамском языке).
10. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv [и др.]; под ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2007. Ч. 1. 607 с.

Поступила 07.09.2016 Подписана в печать 10.11.2016 Опубликована онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. QCXDVN 02:2008/BXD: Vietnamese Building Code. Natural Physical and Climatic Data for Construction. Hanoi, 2000. 322 (in Vietnamese).
2. Khai Fam Ngok, Kha Fam V'et (2004) *Technique of Extraction of Underground Water*. Hanoi, Agriculture Publ. 158 (in Vietnamese).
3. Khieu Din Dyk (2014) *Study the Possibility of Using Underground Water to Cool the Barn for the Animals in Central Vietnam*. Da Nang, Da Nang University. 101 (in Vietnamese).
4. Nguen Zui Khoan et al. (1999) *Livestock Farming*. Hanoi, Agriculture Publ. 150 (in Vietnamese).
5. Fyong Nguen Chung (2013) *Handbook in Livestock Farming*. Hanoi, Agriculture Publ. 63 (in Vietnamese).
6. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. (1981) *Heat Transfer*. Moscow, Energoizdat Publ. 418 (in Russian).
7. Thin Hoang Dinh (2001) *Heat Transfer and Heat Exchangers*. Hanoi, Science and Technique Publ. 582 (in Vietnamese).
8. Bejan A., Kraus A. D. (2003) *Heat Transfer Handbook*. Wiley. 1496.
9. Tin Vo Ti (2005) *Air Conditioning*. Hanoi, Science and Technique Publ. 490 (in Vietnamese).
10. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpolskii V. I., Akelev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerezko A. V. (2007) *Heat- and Mass Exchange. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University. 607 (in Russian).

Received: 7 September 2016 Accepted: 10 November 2016 Published online: 7 March 2017