

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 61, № 1
2018

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Романюк Ф. А., Булойчик Е. В., Гурьянчик О. А., Каченя В. С.** Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ 5
- Фурсанов М. И., Золотой А. А.** Об управлении режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID 15
- Жежеленко И. В.** Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии 28
- Шейников А. А., Суходолов Ю. В.** Использование динамических свойств спектров последовательностей радиоимпульсов для обеспечения высокой чувствительности тестового контроля обмоток асинхронных двигателей 36

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Хрусталева Б. М., Сизов В. Д.** Определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций 47
- Mehdizadeh M. A., Kalinichenko A. S., Lapyonok S. A.** Ecological and Economic Efficiency of Traditional and Alternative Methods of Electrical Energy Production with the Features of the Islamic Republic of Iran
(**Мехдизаде, М. А., Калинин А. С., Лапёнок С. А.** Эколого-экономическая эффективность традиционных и альтернативных способов получения электрической энергии с учетом особенностей Исламской Республики Иран) ... 60
- Овсянник А. В., Макеева Е. Н.** Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях 70

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Иванова И. Е., Ивашечкин В. В., Веремён В. В.** Теоретические исследования процесса выщелачивания кольматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации 80

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 17.01.2018. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2018. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 61, No 1
2018

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

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

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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Romaniuk F. A., Bulochyk E. V., Huryanchyk O. A., Kachenya V. S. The Reliability of Determining the Short Circuit Zone of the Lines of 6–35 kV	5
Fursanov M. I., Zolotoy A. A. On the Management of Urban Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID	15
Zhezhelanko I. V. The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy	28
Sheinikov A. A., Suchodolov Yu. V. The Use of the Dynamic Properties of Spectra of Sequences of Radio Pulses to Ensure High Sensitivity of the Test Control Windings of Asynchronous Motors	36

HEAT POWER ENGINEERING

Khroustalev B. M., Sizov V. D. Determining Heat Transmission Resistance of Enclosing Structures.	47
Mehdizadeh M. A., Kalinichenko A. S., Lapyonok S. A. Ecological and Economic Efficiency of Traditional and Alternative Methods of Electrical Energy Production with the Features of the Islamic Republic of Iran	60
Ovsyannik A. V., Makeeva E. N. Determining of Parameters of Heat Exchange for Vaporization of the Mixed Refrigerant on the High Thermal Conductivity Sintered Powder Capillary-Porous Coatings	70

HYDRAULIC POWER ENGINEERING

Ivanova I. E., Ivashechkin V. V., Veremenyuk V. V. Theoretical Studies of the Leaching Process of the Mudding Element in the Gravel Package of the Well Filter Using the Unit for Reverse-Reagent Regeneration	80
---	----

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 17.01.2018. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2018. Order list .

ADDRESS

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

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

© Belarusian National Technical University, 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14

УДК 621.316.925

Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ

Ф. А. Романюк¹⁾, Е. В. Булойчик¹⁾, О. А. Гурьянчик¹⁾, В. С. Каченя¹⁾

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

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

Реферат. В работе представлен способ повышения достоверности определения зоны короткого замыкания в токовых ступенчатых защитах линий 6–35 кВ с односторонним питанием с целью улучшения показателей их технического совершенства. Учитывая относительную простоту токовой защиты, наиболее целесообразным для реализации в алгоритме ее функционирования из существующих методов определения места повреждения представляется односторонний дистанционный метод по параметрам аварийного режима с учетом вида повреждения. Отмечены основные факторы, влияющие на достоверность определения зоны короткого замыкания на основе дистанционного метода. Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние нагрузочных токов и переходных сопротивлений различного уровня на величину и характер изменения погрешностей определения расчетной удаленности места повреждения от места установки защиты при учете погрешностей измерительных трансформаторов. Показано, что во многих случаях дуговых коротких замыканий на нагруженной линии для определения зоны короткого замыкания с удовлетворительными погрешностями необходима коррекция расчетного расстояния до места повреждения, вычисленного по параметрам поврежденной петли (петель). По результатам вычислительного эксперимента получены корректирующие выражения на основе двух относительных несимметрий токов, определяемых по действующим значениям разностей фазных токов линии для выявления вида короткого замыкания. Выполнена оценка работоспособности предложенного способа. Показано, что применение этого способа коррекции позволяет повысить достоверность определения зоны повреждения. Исследованы динамические свойства предложенного метода для различных режимов работы линии. Установлено, что в наихудшем случае обеспечивается определение зоны повреждения за время, не превышающее 26 мс.

Ключевые слова: линия электропередачи, токовая защита, техническое совершенство, относительная несимметрия, зона короткого замыкания, переходное сопротивление, быстродействие

Для цитирования: Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 5–14. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14

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

The Reliability of Determining the Short Circuit Zone of the Lines of 6–35 kV

F. A. Romaniuk¹⁾, E. V. Bulochyk¹⁾, O. A. Huryanichy¹⁾, V. S. Kachenya¹⁾

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

Abstract. A method of increasing the reliability of determining the zone of short-circuit at the current step protection of the lines of 6–35 kV with unilateral power, aimed at improvement of their technical perfection, is presented in the paper. Having taken the relative simpleness of the current protection into account the authors consider the unilateral remote method of accounting the parameters of the emergency mode and the type of fault to be the most suitable for the implementation of the algorithm of its functioning as compared with the existing methods of fault location. The major factors affecting the accuracy of determining the short circuit zone based on the remote method are noted. With the use of the method of computational experiment the influence of the load currents and contact resistances of various levels on the magnitude and character of changes of errors of determination of the calculated distance of the point of fault from the protection installation location taking into account the errors of measuring transformers. It is demonstrated that in many cases of arc short circuit in a loaded line in order to define the zone of short-circuit with fair accuracy correction of the estimated distance to the fault as calculated by the parameters of the damaged loop (loops) is required. According to the results of numerical experiments corrective expressions on the basis of two relative asymmetry currents determined by the current values of the differences of the phase currents of the line for detecting a type of a short circuit have been obtained. The assessment of the efficiency of the proposed method has been performed. It is shown that the application of the proposed correction method makes it possible to increase the accuracy of fault zone detection. The dynamic properties of the proposed method applied to different modes of the line functioning have been studied. It is determined that in the worst case the definition of the fault zone for a maximum duration of 26 μ sec is provided.

Keywords: power line, current protection, technical excellence, relative asymmetry, short-circuit area, contact resistance, operation speed

For citation: Romaniuk F. A., Bulochyk E. V., Huryanichy O. A., Kachenya V. S. (2018) The Reliability of Determining the Short Circuit Zone of the Lines of 6–35 kV. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 5–14. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14 (in Russian)

Введение

Для защиты линий электропередачи 6–35 кВ с односторонним питанием от междуфазных коротких замыканий (КЗ) преимущественно используются ступенчатые токовые защиты. Зона действия быстродействующей ступени таких защит ограничена и изменяется в зависимости от вида повреждения, режима работы сети и наличия переходного сопротивления в месте повреждения [1, 2]. Вследствие этого в ряде случаев указанная ступень может быть неэффективна. Расширить зону мгновенного отключения токовой защиты и ограничить влияние на нее указанных выше факторов возможно путем использования достоверной информации о зоне короткого замыкания [3–5].

Токовые ступенчатые защиты линий распределительных сетей по принципу выполнения относятся к наиболее простым. Чтобы избежать существенного их усложнения, определение зоны повреждения целесообразно производить на основе одностороннего дистанционного метода по параметрам аварийного режима [6–8].

Погрешности определения зоны повреждения на основе дистанционного метода обусловлены главным образом следующими факторами:

- погрешностями электромагнитных трансформаторов тока и напряжения;
- влиянием свободных составляющих электромагнитного переходного процесса;
- неточностью задания параметров линии;
- переходным сопротивлением в месте повреждения;
- токами нагрузочного режима;
- другими факторами.

Поскольку расчет ведется по параметрам петли междуфазного КЗ, исключается влияние общего переходного сопротивления (на землю), но не исключается влияние фазных переходных сопротивлений. По этим же соображениям для междуфазных КЗ не учитывается взаимоиндукция. Также если нейтраль трансформатора не заземлена, то можно пренебречь влиянием ответвлений.

Определение зоны короткого замыкания

Определение зоны повреждения в токовой защите осуществляется путем сравнения полученного расчетного расстояния $l_{\text{КЗ}}$ от места установки защиты до точки КЗ с длиной защищаемой линии. При этом алгоритм определения зоны повреждения реализуется на протяжении интервала времени с момента возникновения короткого замыкания и до его отключения защитой. Расчетная удаленность может определяться при трехфазных КЗ как усредненная по параметрам всех трех петель повреждения, а при двухфазных – по параметрам поврежденной петли [3, 4]. Таким образом, для реализации предлагаемого метода определения зоны повреждения требуется распознавание вида междуфазного КЗ. Вид повреждения определяется согласно [9], для чего рассчитываются два значения относительной несимметрии разностей фазных токов линии:

$$\Delta I_1 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}}; \quad (1)$$

$$\Delta I_2 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{mid}} - I_{\min}}, \quad (2)$$

где $I_{\max}$, $I_{\min}$ – наибольшее и наименьшее действующие значения разностей фазных токов линии; I_{mid} – среднее действующее значение из разностей токов фаз линии.

Анализ предварительных результатов вычислительного эксперимента показал, что для увеличения достоверности определения зоны КЗ в некоторых режимах может потребоваться коррекция расчетного расстояния до точки повреждения. Так, для режимов металлического трехфазного КЗ как при наличии нагрузки, так и при ее отсутствии характерно, что относительная несимметрия $\Delta I_1 \leq 0,04$, а зону повреждения с достаточной достоверностью можно определять как среднее значение по параметрам трех петель КЗ. При наличии в месте КЗ переходного сопротивления погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения возрастают с его увеличением как при работе линии под нагрузкой, так и в режиме холостого хода. Наибольшие погрешности определения зоны имеют место при протекании по линии нагрузочных токов и при изменении переходных сопротивлений R_{π} в диапазоне 5–20 Ом могут достигать 12–55 % соответственно.

Для режимов двухфазного КЗ без нагрузки зона повреждения определяется с приемлемой достоверностью по параметрам поврежденной петли при любых значениях переходного сопротивления. Для этих режимов характерно $\Delta I_1 \geq 1,0$. При наличии нагрузки удовлетворительные результаты получаются при отсутствии переходного сопротивления (металлические КЗ), в этом случае $\Delta I_1 > 1,0$. При наличии переходного сопротивления в месте КЗ в нагрузочном режиме погрешности определения зоны повреждения имеют большие значения, возрастают с увеличением переходного сопротивления R_{π} , и при его изменении в пределах 5–20 Ом могут достигать 8–45 % соответственно. Для указанных режимов характерно $\Delta I_1 < 1,0$.

Таким образом, в большинстве случаев КЗ через переходное сопротивление на нагруженной линии с целью повышения достоверности определения зоны повреждения целесообразно производить коррекцию расчетного расстояния до точки короткого замыкания. По результатам большого количества вычислительных экспериментов были получены корректирующие выражения, позволяющие установить зону повреждения с приемлемой достоверностью, а также определены условия их применения с тем, чтобы обеспечить селективность действия токовой защиты. При этом для выполнения коррекции используются две относительные несимметрии разностей фазных токов, вычисляемые согласно (1) и (2) для выявления вида междуфазного КЗ.

Трехфазное короткое замыкание

Как было отмечено, при $\Delta I_1 \leq 0,04$ коррекция не требуется, в этом случае зона короткого замыкания определяется по параметрам всех трех петель повреждения

$$l_{\text{КЗ}} = \frac{l_{AB} + l_{BC} + l_{CA}}{3}. \quad (3)$$

Для снижения влияния переходного сопротивления в месте КЗ на достоверность определения зоны повреждения расчетную удаленность для каждой петли l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} следует вести по реактивной составляющей их комплексного сопротивления, которая в микропроцессорной токовой защите может быть определена на основе информации о входных токах и напряжениях в виде ортогональных составляющих [3, 4].

При уровне относительной несимметрии $\Delta I_1 > 0,04$ коррекция производится по выражению

$$l_{КЗ} = kl_{cp,min} - (k - 1)l_{cp,max}, \quad (4)$$

где k – корректирующий коэффициент; $l_{cp,min}$, $l_{cp,max}$ – наименьшее и наибольшее из усредненных расчетных расстояний до места повреждения $l_{cp,1}$ и $l_{cp,2}$, рассчитываемых по выражениям:

$$l_{cp,1} = \frac{l_{AB} + l_{BC} + l_{CA}}{3}; \quad (5)$$

$$l_{cp,2} = \frac{l_{max} + l_{min}}{2}, \quad (6)$$

l_{max} , l_{min} – наибольшее и наименьшее значения из трех l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} .

Корректирующий коэффициент вычисляется в зависимости от величины рассчитываемой по (2) относительной несимметрии ΔI_2 :

$$k = \begin{cases} 1 + \Delta I_2 & \text{при } \Delta I_2 > 1,1; \\ 2 + \Delta I_2 & \text{при } \Delta I_2 \leq 1,1. \end{cases} \quad (7)$$

Двухфазное короткое замыкание

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что при $\Delta I_1 > 0,95$ зона повреждения определяется с приемлемой достоверностью и необходимость в коррекции отсутствует. При этом $l_{КЗ}$ вычисляется по параметрам поврежденной петли, которая выбирается по наибольшему действующему значению тока. Аналогичным образом определяется расчетное расстояние до точки повреждения при $0,95 \geq \Delta I_1 > 0,80$ и $\Delta I_2 > 7$.

В остальных случаях, т. е. при $0,95 \geq \Delta I_1 > 0,80$; $\Delta I_2 \leq 7,00$ и при $\Delta I_1 \leq 0,80$, независимо от уровня ΔI_2 , коррекция производится по выражению

$$l_{КЗ} = l_{пп} \left(1 - \frac{1}{\Delta I_2} \right), \quad (8)$$

где $l_{пп}$ – расчетное расстояние до точки повреждения, определяемое по параметрам поврежденной петли.

Результаты исследования работоспособности метода

Работоспособность предложенного алгоритма исследовалась методом вычислительного эксперимента на базе программного комплекса, воспроизводящего математическую модель узла распределительной сети 6–35 кВ с односторонним питанием, которая включает в себя измерительные трансформаторы тока и напряжения, что позволяет учесть влияние их погрешностей на достоверность определения зоны повреждения [10, 11].

В качестве оценочных параметров метода повышения достоверности установления зоны КЗ приняты относительная погрешность δ определения расчетной удаленности точки повреждения и время определения зоны повреждения. Ввиду того что определение зоны короткого замыкания предполагается использовать в качестве защитной функции, к предложенному алгоритму предъявляются высокие требования по быстродействию. Высокая точность определения расчетной удаленности при этом в большинстве случаев не требуется, за исключением отрезков в конце контролируемой и начале смежной линий, когда значительные погрешности могут привести к сокращению зоны мгновенного отключения защиты или к ее неселективному действию.

Относительная погрешность рассчитывается по выражению

$$\delta = \frac{l_{*КЗ} - l_{*ф}}{l_{*ф}} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $l_{*ф}$ – фактическое расстояние до места КЗ.

Анализ работоспособности предложенного алгоритма проводился для наихудшего случая. При металлических КЗ в конце защищаемой линии, где достоверность установления зоны повреждения особенно важна, относительные погрешности определения $l_{КЗ}$ не велики и составляют не более 2,5 %. В указанных режимах $\Delta I_1 > 0,95$ при двухфазных и $\Delta I_1 < 0,04$ при трехфазных КЗ и коррекция $l_{КЗ}$ не производится. Короткие замыкания на ненагруженной линии характеризуются меньшими погрешностями определения $l_{КЗ}$ по сравнению с аналогичными повреждениями в нагрузочном режиме. Таким образом, наихудшим случаем является КЗ через переходное сопротивление на нагруженной линии.

Полученные по результатам вычислительного эксперимента зависимости $\delta = f(l_*)$ с учетом предложенного способа коррекции для случаев трех- и двухфазного КЗ через переходное сопротивление в нагрузочном режиме на линии с односторонним питанием представлены на рис. 1, 2. При этом если $l_* \leq 1$, то местом повреждения является контролируемая линия, а при $l_* > 1$ – смежная.

Область допустимых значений относительных погрешностей, при которых обеспечивается достоверное установление зоны КЗ, ограничивается кривой предельных погрешностей (рис. 1, 2, зависимость 1). При повреждении в пределах защищаемой линии значения относительной погрешности должны лежать ниже кривой 1, а при КЗ на смежной линии – выше, в противном случае зона КЗ будет установлена неверно.

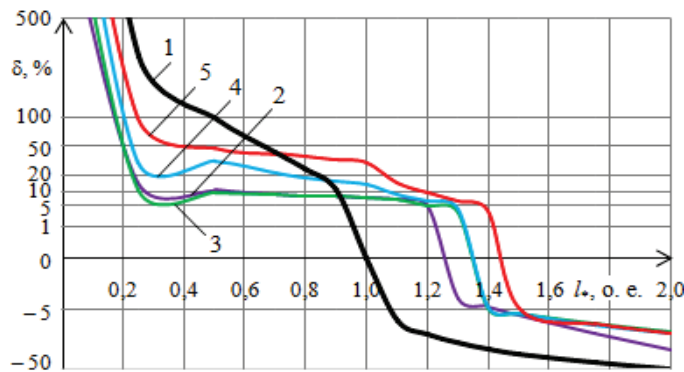


Рис. 1. Относительные погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения l_{K3} при трехфазных коротких замыканиях: 1 – кривая предельных погрешностей; 2, 3, 4, 5 – короткое замыкание через переходное сопротивление с $R_n = 5; 10; 15; 20$ Ом соответственно

Fig. 1. Relative error of determining estimated distances to the point of fault l_{K3} when the three-phase short circuits take place: 1 – curve of marginal errors; 2, 3, 4, 5 – short circuit via contact resistance with $R_n = 5; 10; 15; 20$ Ohm, respectively

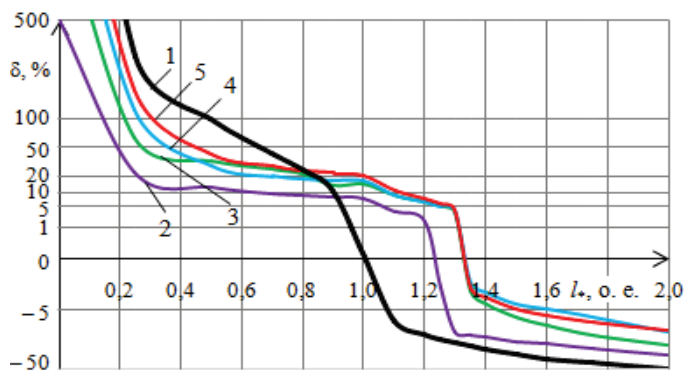


Рис. 2. Относительные погрешности определения расчетного расстояния до точки повреждения l_{K3} при двухфазных коротких замыканиях: 1–5 – то же, что на рис. 1

Fig. 2. Relative error of determining the estimated distance to the point of fault l_{K3} when two-phase short circuits take place: 1–5 – the same as in fig. 1

Из представленных зависимостей очевидно, что наличие переходного сопротивления R_n приводит к увеличению погрешности определения l_{K3} . Характер изменения зависимостей $\delta = f(l_*)$ для трех- и двухфазных КЗ примерно одинаков, причем в обоих случаях уровни относительной погрешности в конце защищаемой линии при переходных сопротивлениях в месте повреждения $R_n = (5-15)$ Ом составляют приблизительно от 8 до 20 % соответственно. При $R_n = 20$ Ом при трехфазных КЗ относительная погрешность не превышает 32 % и составляет порядка 21 % при двухфазных. Следует отметить, что реально существующие погрешности положительного знака приводят к сокращению зоны действия быстродействующей ступени. Влияние погрешностей измерительных трансформато-

ров тока из-за их работы в режимах насыщения или близких к ним особенно сильно сказывается при повреждении в начале линии, что обуславливает существенные значения относительной погрешности определения $l_{КЗ}$, которые тем не менее не выходят за кривую предельных погрешностей, и зона КЗ фиксируется достоверно. При этом для КЗ через переходное сопротивление в диапазоне $R_{п} = (5–20)$ Ом обеспечивается охват быстродействующей ступенью токовой защиты соответственно не менее 70–90 % от длины линии при симметричных и порядка от 80–90 % при несимметричных повреждениях.

Для достоверного установления зоны повреждения с учетом различного рода погрешностей целесообразно сравнивать вычисленное расстояние до места повреждения не с фактической длиной линии $l_{ф}$, а с ее скорректированным значением. Соображения, положенные в основу расчета корректирующего коэффициента K_k , рассмотрены в [3]. Отметим только, что с учетом реально существующих погрешностей можно принять $K_k > 1$ для расширения зоны действия быстродействующей ступени, однако для надежного обеспечения селективного действия защиты контролируемой линии, что является определяющим, указанный коэффициент следует принять $K_k < 1$. На основании результатов вычислительного эксперимента пороговое значение $l_{ф.п.}$, при котором КЗ фиксируется на защищаемой линии, ориентировочно может быть принято на уровне $l_{ф.п.} = 0,95$.

Время установления зоны КЗ, характеризующее быстродействие предложенного метода, представляет собой интервал времени от момента возникновения режима КЗ до момента времени, когда вычисленное относительное значение $l_{*КЗ}$ достигнет принятого порогового значения $l_{*ф.п.}$, т. е. когда $l_{*КЗ} \leq 0,95$. Оценить указанное время позволяют представленные на рис. 3 динамические характеристики.

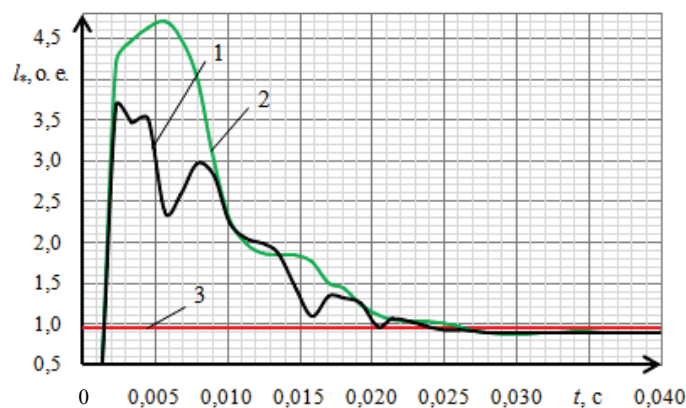


Рис. 3. Динамические характеристики алгоритма определения зоны повреждения в наихудшем случае: 1, 2 — трех- и двухфазное короткое замыкание; 3 — принятое пороговое значение $l_{*ф.п.} = 0,95$

Fig. 3. The dynamic characteristics of the algorithm for fault areas determining in the worst case: 1, 2 — three-phase and two-phase short circuit; 3 — adopted threshold $l_{*ф.п.} = 0,95$

Динамические характеристики построены для наихудшего режима, когда быстрое действие метода минимально, а именно – при повреждении в конце защищаемой линии ($I_* = 0,9$) в нагрузочном режиме. Их анализ показывает, что предложенный метод позволяет определить зону повреждения при двух- и трехфазных КЗ за время, не превышающее 26 мс.

ВЫВОД

Достоверность определения зоны повреждения на линиях 6–35 кВ может быть повышена за счет использования корректирующих выражений на основе двух относительных несимметрий разностей фазных токов, полученных по результатам большого числа вычислительных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
2. Басс, Э. И. Релейная защита электроэнергетических систем / Э. И. Басс, В. Г. Дорогунцев; под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 296 с.
3. Романюк, Ф. А. Определение места короткого замыкания на линиях радиальных сетей с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, А. А. Тищенко, Е. В. Булович // Наука и техника. 2012. № 4. С. 69–73.
4. Романюк, Ф. А. Определение места короткого замыкания на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит / Ф. А. Романюк, А. А. Тищенко, О. А. Гурьянич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 6. С. 5–13.
5. Романюк, Ф. А. Определение места повреждения на линиях напряжением 6–35 кВ с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 5. С. 5–14.
6. Шнейерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнейерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
7. Шнейерсон, Э. М. Дистанционные защиты / Э. М. Шнейерсон. М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.
8. Аржанников, Е. А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, А. М. Чухин. М.: НТФ «Энергопрогресс», 1998. 64 с. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 3).
9. Определение вида повреждения в токовых защитах линий электропередачи 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 497–504. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-497-504.
10. Новаш, И. В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2013. 225 с.
11. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. 174 с.

REFERENCES

1. Fedoseev A. M., Fedoseev M. A. (1992) *Relay Protection of Electric Power Systems*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 528 (in Russian).
2. Bass E. I., Doroguntsev V. G., D'yakov A. F. (ed.) (2002) *Relay Protection of Electric Power Systems*. Moscow, MHEI Publ. 296 (in Russian).
3. Romaniuk F., Tishechkin A., Buloychik E. (2012) Detection of Short Circuit Location in Radial Network Lines with One-Side Supply. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (4), 69–73 (in Russian).
4. Romaniuk F. A., Tishechkin A. A., Gurjanchik O. A. (2010) Detection of Short-Circuit Location in Distribution Mains Line within Functions of Micro-Processor Current Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 5–13 (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Shevaldin M. A. (2014) Detection of Fault Location on the Power Lines 6–35 kV with Unilateral Feed. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 5–14 (in Russian).
6. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
7. Shneerson E. M. (1986) *Distance Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 448 (in Russian).
8. Arzhannikov E. A., Chukhin A. M. (1998) *Methods and Devices for the Localization of Faults of Power Lines. Electrical Engineer Small Library, Supplement to the "Energetik" Journal*. Moscow, Energoprogress Publ. 64 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Buloychik E. V., Huryanchyk O. A., Shevaldin M. A. (2017) Determining a Type of a Damage in the Current Protection of Power Lines of 6–35 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 497–504 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-497-504.
10. Novash V. I., Romaniuk F. A. (2013) *Mathematical Modeling of Switching Modes in Electrical Systems with Transformers*. Minsk, Belarusian National Technical University. 225 (in Russian).
11. Romaniuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automation of Power Systems*. Minsk, VUZ-YuNITI Publ. 174 (in Russian).

Received: 11 December 2017 Accepted: 12 January 2018 Published online: 29 January 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27

УДК 621.311.017

Об управлении режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID

М. И. Фурсанов¹⁾, А. А. Золотой¹⁾

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

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

Реферат. Рассмотрены вопросы перспективного управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID, которые будут совершенно иными по сравнению с традиционными пониманием и подходами. Это требует выбора и применения соответствующих аналитических критериев и подходов к оценке, анализу и управлению режимами сетей. В качестве таких критериев рекомендуются: в частном случае – оптимальный (минимальный) технологический расход электроэнергии (потери), а в общем виде – экономически обоснованное (минимальное) значение стоимости передачи электрической энергии. При этом необходимо иметь в виду, что современные городские сети активно насыщаются распределенными источниками малой генерации, коренным образом изменившими структуру электрических сетей, поэтому учет таких источников в задачах управления режимами городских электрических сетей, как традиционных, так и в условиях SMART GRID, становится абсолютно необходимым. Разработан и приведен пример анализа и управления режимом городской электрической сети 10 кВ с распределенными источниками малой генерации по критерию теоретического минимума относительных потерь активной мощности в схеме контрольного примера. Проведенные исследования позволяют определить величину допустимого отклонения режима сети от точки теоретического минимума.

Ключевые слова: управление, режим, городская сеть, критерий, оптимум, потери, стоимость, распределенный источник, малая генерация

Для цитирования: Фурсанов, М. И. Об управлении режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 15–27. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27

On the Management of Urban Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID

M. I. Fursanov¹⁾, A. A. Zalotuy¹⁾

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

Abstract. The issues of prospective operation of the city electric networks in the conditions of the SMART GRID, which will be quite different as compared to the traditional understanding and approaches, are under consideration. This requires the selection and application of appropriate

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

analytical criteria and approaches to assessment, analysis and control of the networks. With this regard the following criteria are recommended: in a particular case – the optimal (minimal) technological electric power consumption (losses), while in general – economically reasonable (minimal) cost value of electric power transmission. It should be also borne in mind that contemporary urban networks are actively saturated with distributed sources of small generation that have radically changed the structure of electrical networks; therefore, account for such sources is an absolutely necessary objective of management regimes of urban electric networks, both traditional and in associated with the SMART GRID. A case of the analysis and control of urban electric 10 kV networks with distributed small sources of generation has been developed and presented according to the theoretical criterion of minimum relative active power losses in the circuit as a control case. The conducted research makes it possible to determine the magnitude of the tolerance network mode from the point of the theoretical minimum.

Keywords: control, mode, urban network, criterion, optimum, losses, cost, distributed source, small generation

For citation: Fursanov M. I., Zolotoy A. A. (2018) On the Management of Urban Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1) 15–27. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27 (in Russian)

Введение

Городские интеллектуальные электрические сети (SMART GRID) представляют собой систему нового поколения [1–3], позволяющую оперативно и в автоматическом режиме эффективно осуществлять бесперебойное электроснабжение потребителей при минимальном участии человеческого фактора. Это означает, что в перспективе управление режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID по сравнению с традиционным пониманием и подходами будет совершенно иным. Современная электрическая сеть считается несовершенной, и ее состояние постоянно улучшается. Городская сеть SMART GRID «идеальна», и управление ее режимами должно осуществляться только при отклонении реальных эксплуатационных режимов электрических сетей от оптимальных. Это требует определения и применения адекватных аналитических критериев и подходов к оценке, анализу и управлению режимами сетей. Опыт, дискуссии, аналитические исследования и расчеты показали, что в качестве таких критериев можно рекомендовать оптимальный (минимальный) технологический расход электроэнергии (потери), когда поддержание эффективных режимов работы сети обеспечивается на основе организационных мероприятий, а в общем случае – экономически обоснованное (минимальное) значение стоимости энергии, поддержание которой следует выполнять на основе аналитически обоснованных (выбранных и внедренных) мероприятий [4–6]. При этом необходимо иметь в виду, что современные городские сети активно насыщаются распределенными источниками малой генерации [7–9]. К ним относят турбины внутреннего сгорания, ветроустановки, фотоэлектрические установки, электростанции на биомассах, топливные элементы, микротурбины, накопители электроэнергии, солнечные батареи и т. д. Системы распределенной генерации коренным образом изменили структуру городских электрических сетей. Если раньше потребитель получал электропитание в основном от двух питающих подстанций энер-

госистемы, то в условиях SMART GRID потребитель может не только получать часть электрической энергии от собственного источника питания, но и работать в изолированном от энергосистемы режиме в условиях своей микроэнергосистемы. Распределенные источники малой генерации подключаются к шинам трансформаторных подстанций (ТП) 6–10/0,4 кВ, в том числе на стороне нагрузки, и оснащаются автоматикой для обеспечения синхронной работы с энергосистемой и поддержания автономных режимов, поэтому учет таких источников в задачах управления режимами городских электрических сетей, как традиционных, так и в условиях SMART GRID, становится совершенно необходимым.

Пример анализа режима интеллектуальной сети 10 кВ

В статье рассмотрен пример анализа режима городской электрической сети 10 кВ с распределенными источниками малой генерации по критерию теоретического минимума относительных потерь активной мощности в схеме контрольного примера.

Схема и параметры городской распределительной электрической сети 10 кВ с распределенными источниками малой генерации в условиях SMART GRID представлена на рис. 1.

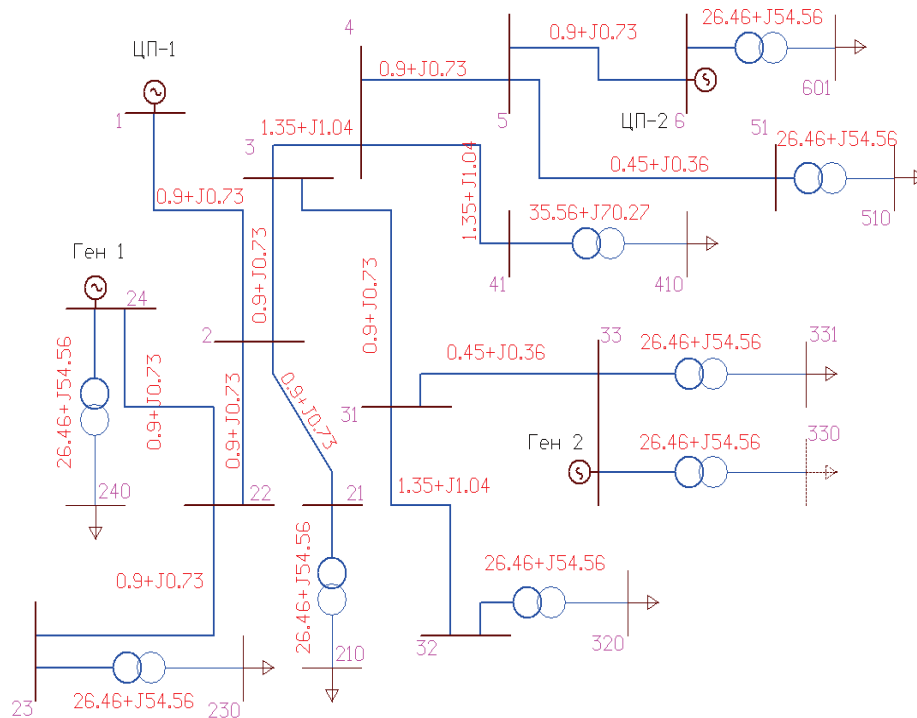


Рис. 1. Схема городской распределительной электрической сети 10 кВ с распределенными источниками малой генерации в условиях SMART GRID

Fig. 1. Scheme of city distribution 10 kV electric network with distributed sources of small generation in the conditions of the SMART GRID

Кроме двух центров питания (ЦП-1 и ЦП-2) в узлах 1 и 6, в схеме дополнительно присутствуют два источника малой генерации (Ген 1 в узле 24 и Ген 2 в узле 33). По условию задачи источник малой генерации в узле 24 имеет средства регулирования напряжения и активной мощности, позволяющие источнику осуществлять работу на выделенную нагрузку отдельно от основной схемы сети. Источник малой генерации в узле 33 по условию имеет средства регулирования напряжения и не имеет средств регулирования активной мощности, поэтому может работать только параллельно с сетью. Номинальная мощность генерирующего источника в узле 24 достаточна для питания выделенной нагрузки в узлах 23 и 24 схемы. В этой связи по условиям обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей допускается размещение точек нормального разрыва схемы в ветвях 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–6, 2–22 и 22–24. В остальных ветвях схемы установка точек нормального разрыва не допускается.

Параметры источников малой генерации:

- в узле 24: $P_r = 0,079$ кВт, $U = 10$ кВ, $Q_{\min} = 0$, $Q_{\max} = 0,055$ квар;
- в узле 33: $P_r = 0,109$ кВт, $U = 10$ кВ, $Q_{\min} = 0$, $Q_{\max} = 0,235$ квар.

В качестве режимной информации рассмотрены нормальные изменения нагрузок сети в течение суток. Графики суточных изменений нагрузок в узлах схемы сети приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Суточные изменения активной нагрузки в узлах схемы контрольного примера

Diurnal changes in resistive load in the schema notes of the test case

Часы суток	Активная нагрузка P в узлах схемы, МВт								
	601	210	230	240	320	330	410	510	331
0	0,0237	0,0187	0,0150	0,0311	0,0092	0,0312	0,0182	0,0348	0,0464
1	0,0261	0,0187	0,0150	0,0272	0,0161	0,0437	0,0182	0,0285	0,0464
2	0,0277	0,0187	0,0150	0,0311	0,0184	0,0500	0,0182	0,0222	0,0464
3	0,0293	0,0187	0,0180	0,0350	0,0437	0,0562	0,0182	0,0222	0,0557
4	0,0277	0,0187	0,0150	0,0311	0,0184	0,0625	0,0182	0,0253	0,0464
5	0,0316	0,0257	0,0183	0,0388	0,0391	0,0812	0,0250	0,0285	0,0567
6	0,0395	0,0304	0,0217	0,0466	0,0276	0,0250	0,0273	0,0380	0,0670
7	0,0474	0,0327	0,0283	0,0505	0,0345	0,0937	0,0341	0,0475	0,0825
8	0,0553	0,0397	0,0317	0,0583	0,0391	0,1062	0,0387	0,0539	0,0773
9	0,0712	0,0444	0,0317	0,0660	0,0437	0,1187	0,0432	0,0602	0,0722
10	0,0791	0,0468	0,0300	0,0738	0,0575	0,1249	0,0455	0,0634	0,0619
11	0,0633	0,0421	0,0283	0,0932	0,0414	0,1187	0,0432	0,0602	0,0567
12	0,0553	0,0351	0,0250	0,0699	0,0299	0,0812	0,0387	0,0539	0,0773
13	0,0474	0,0374	0,0250	0,0505	0,0207	0,0562	0,0159	0,0222	0,0773
14	0,0593	0,0397	0,0267	0,0660	0,0253	0,0687	0,0159	0,0222	0,0619
15	0,0577	0,0374	0,0283	0,0738	0,0276	0,0749	0,0091	0,0127	0,0670
16	0,0553	0,0374	0,0267	0,0621	0,0322	0,0874	0,0091	0,0127	0,0773
17	0,0514	0,0351	0,0267	0,0583	0,0345	0,0937	0,0296	0,0222	0,0877

Окончание табл. 1

Часы суток	Активная нагрузка P в узлах схемы, МВт								
	601	210	230	240	320	330	410	510	331
18	0,0498	0,0327	0,0267	0,0544	0,0138	0,0375	0,0287	0,0190	0,0619
19	0,0474	0,0281	0,0300	0,0466	0,0276	0,0500	0,0273	0,0253	0,0928
20	0,0395	0,0257	0,0334	0,0427	0,0207	0,0812	0,0228	0,0222	0,1031
21	0,0356	0,0210	0,0283	0,0350	0,0253	0,0687	0,0205	0,0285	0,0877
22	0,0316	0,0187	0,0283	0,0311	0,0138	0,0375	0,0182	0,0348	0,0877
23	0,0277	0,0164	0,0267	0,0272	0,0115	0,0312	0,0159	0,0317	0,0825
Средн.	0,0450	0,0300	0,0250	0,0500	0,0280	0,0700	0,0250	0,0330	0,0700

Таблица 2

Суточные изменения реактивной нагрузки в узлах схемы рис. 1

Diurnal changes in reactive load in the schema notes of fig. 1

Часы суток	Реактивная нагрузка Q в узлах схемы, Мвар								
	601	210	230	240	320	330	410	510	331
0	0,0105	0,0094	0,0060	0,0124	0,0059	0,0134	0,0087	0,0232	0,0199
1	0,0116	0,0094	0,0060	0,0109	0,0104	0,0187	0,0087	0,0190	0,0199
2	0,0123	0,0094	0,0060	0,0124	0,0118	0,0214	0,0087	0,0148	0,0199
3	0,0130	0,0094	0,0072	0,0140	0,0281	0,0241	0,0087	0,0148	0,0239
4	0,0123	0,0094	0,0060	0,0124	0,0118	0,0268	0,0087	0,0169	0,0199
5	0,0141	0,0129	0,0073	0,0155	0,0252	0,0348	0,0120	0,0190	0,0243
6	0,0176	0,0152	0,0087	0,0186	0,0178	0,0107	0,0131	0,0253	0,0287
7	0,0211	0,0164	0,0113	0,0202	0,0222	0,0401	0,0164	0,0317	0,0354
8	0,0246	0,0199	0,0127	0,0233	0,0252	0,0455	0,0186	0,0359	0,0331
9	0,0316	0,0222	0,0127	0,0264	0,0281	0,0509	0,0208	0,0401	0,0309
10	0,0351	0,0234	0,0120	0,0295	0,0370	0,0535	0,0219	0,0422	0,0265
11	0,0281	0,0210	0,0113	0,0373	0,0266	0,0509	0,0208	0,0401	0,0243
12	0,0246	0,0175	0,0100	0,0280	0,0192	0,0348	0,0186	0,0359	0,0331
13	0,0211	0,0187	0,0100	0,0202	0,0133	0,0241	0,0076	0,0148	0,0331
14	0,0264	0,0199	0,0107	0,0264	0,0163	0,0294	0,0076	0,0148	0,0265
15	0,0257	0,0187	0,0113	0,0295	0,0178	0,0321	0,0044	0,0084	0,0287
16	0,0246	0,0187	0,0107	0,0249	0,0207	0,0375	0,0044	0,0084	0,0331
17	0,0228	0,0175	0,0107	0,0233	0,0222	0,0401	0,0142	0,0148	0,0376
18	0,0221	0,0164	0,0107	0,0217	0,0089	0,0161	0,0138	0,0127	0,0265
19	0,0211	0,0140	0,0120	0,0186	0,0178	0,0214	0,0131	0,0169	0,0398
20	0,0176	0,0129	0,0133	0,0171	0,0133	0,0348	0,0109	0,0148	0,0442
21	0,0158	0,0105	0,0113	0,0140	0,0163	0,0294	0,0098	0,0190	0,0376
22	0,0141	0,0094	0,0113	0,0124	0,0089	0,0161	0,0087	0,0232	0,0376
23	0,0123	0,0082	0,0107	0,0109	0,0074	0,0134	0,0076	0,0211	0,0354
Средн.	0,0200	0,0150	0,0100	0,0200	0,0180	0,0300	0,0120	0,0220	0,0300

Графически суточные изменения потерь активной и реактивной мощностей в схеме рис. 1 показаны на рис. 2, 3.

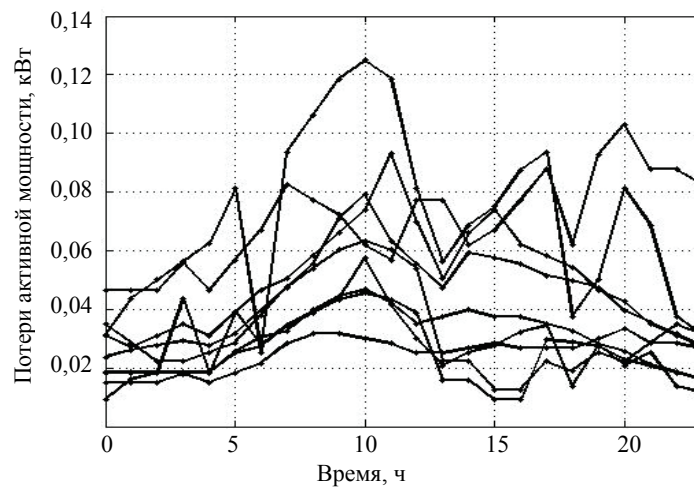


Рис. 2. Суточные графики потерь активной мощности в схеме рис. 1

Fig. 2. Diurnal schedule of active power losses in the schema nodes fig. 1

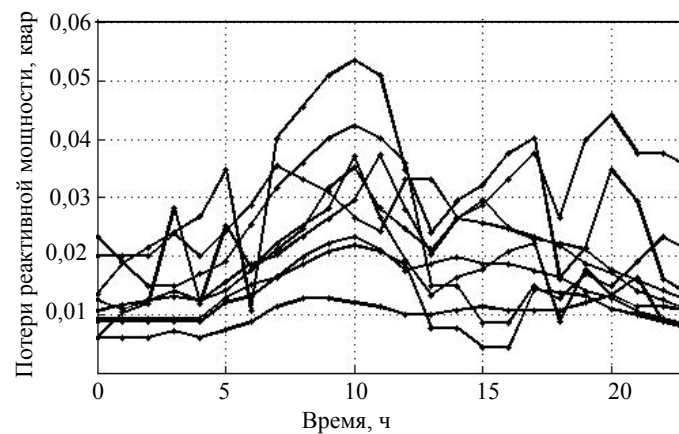


Рис. 3. Суточные графики потерь реактивной мощности в схеме рис. 1

Fig. 3. Diurnal schedule of reactive power losses in the schema nodes fig. 1

Графики изменений активной мощности источников малой генерации в течение суток при параллельной работе с энергосистемой показаны на рис. 4.

Значения активных мощностей источников малой генерации схемы на протяжении суток приведены в табл. 3.

Основные результаты расчета потокораспределения в режиме среднесуточных нагрузок схемы приведены в табл. 4. Расчет выполнен в среде MatLab.

Генерация источников мощности по результатам расчета составила:

- в узле 1 (ЦП-1): $P_r = 81,08$ кВт, $Q_r = -40,50$ квар;
- в узле 6 (ЦП-2): $P_r = 119,23$ кВт, $Q_r = 25,18$ квар;
- в узле 24: $P_r = 79,00$ кВт, $Q_r = 47,51$ квар;
- в узле 33: $P_r = 109,00$ кВт, $Q_r = 206,93$ квар.

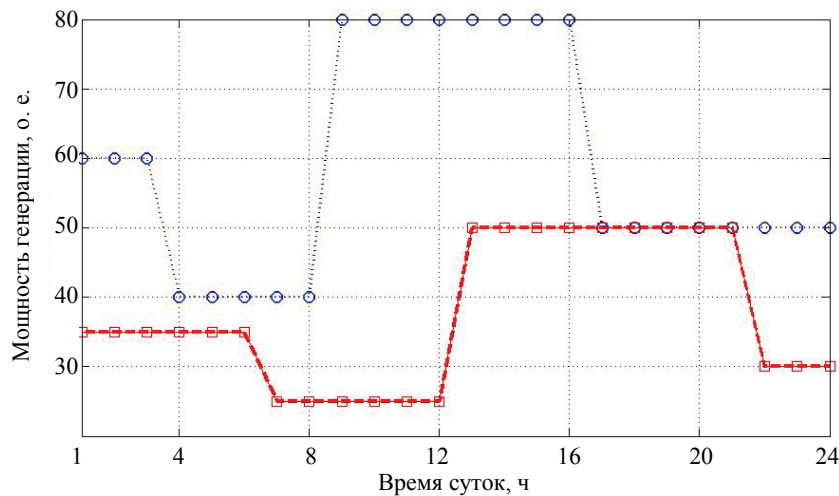


Рис. 4. Суточные графики активной мощности источников малой генерации

Fig. 4. Diurnal schedule of active power of the sources of small generation

Таблица 3

**Значения активных мощностей источников малой генерации
в узлах по часам суток**

**The values of active power of the sources of small generation
it the nodes according to the hours of the day**

Время, ч	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{124}, \text{ кВт}$	80,1	80,1	80,1	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4	106,8	106,8	106,8	106,8
$P_{133}, \text{ кВт}$	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	72,7	72,7	72,7	72,7	72,7	72,7
Время, ч	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$P_{124}, \text{ кВт}$	106,8	106,8	106,8	106,8	66,8	66,8	66,8	66,8	66,8	66,8	66,8	66,8
$P_{133}, \text{ кВт}$	145,3	145,3	145,3	145,3	145,3	145,3	145,3	145,3	145,3	87,2	87,2	87,2

Таблица 4

Результаты расчета потоковраспределения в схеме рис. 1

The results of the calculation of the power flows in the circuit of fig. 1

Ветвь	Поток P , кВт	Поток Q , квар	I , А	ΔP , кВт	ΔQ , квар
1–2	–81,08	40,50	5,23	0,0739	0,0598
2–3	–51,68	58,45	4,51	0,0548	0,0444
3–4	13,19	–45,14	2,72	0,0299	0,0230
4–5	38,72	–30,95	2,86	0,0221	0,0179
5–6	72,84	–2,14	4,21	0,0479	0,0387
2–21	–30,98	–21,53	2,18	0,0128	0,0104
2–22	1,66	3,64	0,23	0,0001	0,0001
22–23	–25,87	–16,30	1,77	0,0084	0,0068
22–24	27,52	19,94	1,96	0,0104	0,0084
3–31	–64,82	103,64	7,06	0,1346	0,1089
31–32	–28,98	–24,53	2,19	0,0195	0,0150
31–33	–35,70	128,27	7,69	0,0798	0,0639
4–41	–25,49	–14,17	1,69	0,0115	0,0088
5–51	–34,10	–28,79	2,58	0,0090	0,0072
6–601	–46,33	–27,28	2,91	0,6730	1,3876
21–210	–30,97	–21,52	1,97	0,3083	0,6357
23–230	–25,86	–16,29	1,58	0,1969	0,4061

Окончание табл. 4

Ветвь	Поток P , кВт	Поток Q , квар	I , А	ΔP , кВт	ΔQ , квар
24–240	–51,47	–27,56	3,19	0,8072	1,6644
32–320	–28,97	–24,51	1,96	0,3044	0,6276
33–330	–72,31	–39,30	4,56	1,6536	3,4096
41–410	–25,48	–14,16	1,63	0,2841	0,5615
51–510	–34,10	–28,78	2,34	0,4353	0,8976
33–331	–72,31	–39,30	4,56	1,6536	3,4096

Суммарные потери активной мощности в схеме составили $\Delta P = 12,32$ кВт, из них нагрузочные потери $\Delta P_{\text{н}} = 6,83$ кВт, потери холостого хода $\Delta P_{\text{х}} = 5,49$ кВт.

Эквивалентуем схему сети по условию равенства потерь активной мощности в исходной и эквивалентной схемах с учетом источников малой генерации для режима среднесуточных нагрузок узлов.

Эквивалентное активное сопротивление схемы r_3 можно вычислить следующим образом:

$$\sum P_{\text{г}} = 81,08 + 119,23 + 79 + 109 = 388,31 \text{ кВт};$$

$$\sum Q_{\text{г}} = -40,5 + 25,18 + 47,51 + 206,93 = 279,62 \text{ квар};$$

$$r_3 = \frac{\Delta P_{\text{н}} U^2}{(\sum P_{\text{г}})^2 + (\sum Q_{\text{г}})^2} = \frac{6,83 \cdot 10^2}{388,31^2 + 279,93^2} \cdot 10^3 = 2,98 \text{ Ом}.$$

В городских распределительных электрических сетях величину ΔP можно вычислить по формуле

$$\Delta P = \frac{\sum P_{\text{г}}^2 + \sum Q_{\text{г}}^2}{U^2} r_3 + \Delta P_{\text{х}}, \quad (1)$$

где ΔP – суммарные потери в схеме; $P_{\text{г}}$, $Q_{\text{г}}$ – активная и реактивная мощности генерации в схеме (включая источники малой генерации); U – напряжение; r_3 – эквивалентное сопротивление схемы; $\Delta P_{\text{х}}$ – активные потери холостого хода.

При эквивалентировании схемы по потерям активной мощности выражение для расчета эквивалентного сопротивления с учетом источников малой генерации будет иметь вид

$$r_3 = \frac{\sum_{i,j} I_{ij}^2 r_{ij}}{\left(\sum_k I_{\text{г}k} \right)^2}, \quad (2)$$

где I_{ij} – ток на участках i – j -схемы; r_{ij} – активное сопротивление участков i – j -схемы; $I_{\text{г}k}$ – ток генерации в схеме.

Принимая $S^2 = \sum P_{\text{г}}^2 + \sum Q_{\text{г}}^2$, запишем (1) в относительных единицах

$$\Delta p = \frac{\Delta P}{S} = \frac{S}{U^2} r_3 + \frac{\Delta P_{\text{х}}}{S} = \frac{S}{U^2} r_3 + \Delta p_{\text{х}}. \quad (3)$$

Теоретический минимум суммарных относительных потерь активной мощности в схеме определится из соотношения

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial S} = \frac{r_3}{U^2} - \frac{\Delta P_x}{S_m^2} = 0, \quad (4)$$

где S_m – значение полной нагрузки сети, соответствующее минимуму относительных потерь активной мощности в схеме.

Выразив S_m из (4), получим

$$S_m = U \sqrt{\frac{\Delta P_x}{r_3}}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (3), после упрощения получим формулу для расчета теоретического минимума относительных потерь активной мощности $\Delta P_{\min}$ в схеме

$$\Delta P_{\min} = \frac{2\sqrt{\Delta P_x r_3}}{U}. \quad (6)$$

Выполним эквивалентирование схемы сети по условию равенства потерь активной мощности в исходной и эквивалентной схемах с учетом источников малой генерации для режима среднесуточных нагрузок узлов.

Эквивалентная схема электрической сети (рис. 1) с $r_3 = 2,98$ Ом приведена на рис. 5.

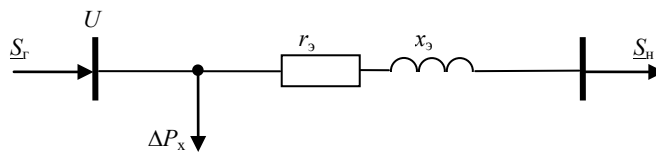


Рис. 5. Эквивалентная схема электрической сети

Fig. 5. The equivalent circuit of electrical network

Потери активной мощности в эквивалентной схеме, вычисленные через эквивалентное сопротивление, совпадают с потерями активной мощности, полученными из результатов расчета режима схемы на рис. 1. Построим и проанализируем зависимость относительных потерь активной мощности в схеме от ее загрузки, используя формулу (3). Загрузку схемы последовательно изменяем в диапазоне от 0,1 до 1,6 МВ · А с шагом 0,1 МВ · А. Результаты вычислений относительных потерь активной мощности в схеме при изменении ее загрузки приведены в табл. 5.

Таблица 5

Относительные потери активной мощности
в зависимости от загрузки схемы рис. 5

The relative losses of active power
depending on the loading of the diagram of fig. 5

S , МВ · А	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$\Delta P_{\text{н}}$, кВт	3,0	6,0	9,0	11,9	14,9	17,9	20,9	23,9
ΔP_x , кВт	54,9	27,4	18,3	13,7	11,0	9,1	7,8	6,9
ΔP , кВт	57,9	33,4	27,3	25,7	25,9	27,1	28,7	30,7
S , МВ · А	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$\Delta P_{\text{н}}$, кВт	26,9	29,8	32,8	35,8	38,8	41,8	44,8	47,7
ΔP_x , кВт	6,1	5,5	5,0	4,6	4,2	3,9	3,7	3,4
ΔP , кВт	33,0	35,3	37,8	40,4	43,0	45,7	48,4	51,2

Графики изменения относительных потерь активной мощности в схеме при изменении ее загрузки представлены на рис. 6.

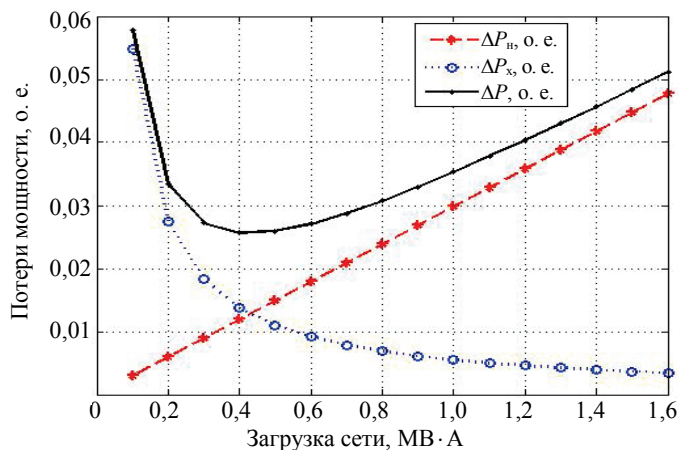


Рис. 6. Зависимость относительных потерь активной мощности от загрузки сети
Fig. 6. The dependence of relative losses of active power on the network load

Из рис. 6 и табл. 5 видно, что теоретический минимум относительных потерь активной мощности в схеме находится в окрестности величины загрузки схемы $S_m \approx 400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ и примерно составляет $\Delta P_{\min} \approx 0,026 \cdot 400 = 10,4 \text{ кВт}$. Точные значения теоретического минимума потерь и соответствующей ему загрузки можно вычислить по формулам (5), (6):

$$S_m = U \sqrt{\frac{\Delta P_x}{r_3}} = 10 \cdot \sqrt{\frac{5,49 \cdot 10^3}{2,98}} = 428,97 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$\Delta P_{\min} = \frac{2\sqrt{\Delta P_x r_3}}{U} S_m = \frac{2 \cdot \sqrt{5,49 \cdot 10^{-3} \cdot 2,98}}{10} \cdot 428,97 = 10,98 \text{ кВт}.$$

На практике добиться точного значения теоретического минимума потерь в схеме невозможно из-за отсутствия реальных механизмов плавного и равномерного изменений загрузки ее элементов. Изменение загрузки сети в условиях эксплуатации можно осуществлять, перераспределяя питания узлов схемы главным образом за счет изменения положений точек нормального размыкания в сети. Практически всегда перенос точки нормального размыкания в другое место схемы изменяет загрузку ее элементов на фиксированные дискретные величины, причем неравномерно и часто рассогласованно. Поэтому величина практического минимума потерь в схеме, достигаемая при оптимизации положений точек нормального размыкания сети, будет всегда больше теоретического минимума. Однако теоретический минимум потерь важен в процессе непрерывного контроля оптимальности состояния сети и определения момента выработки управляющих воздействий для приведения сети в оптимальное состояние при нормальных изменениях ее режимных параметров.

Оценка допустимого отклонения режима сети от теоретического минимума

Произведем оценку допустимого отклонения режима сети от точки теоретического минимума относительных потерь активной мощности при нормальных изменениях режимных параметров для схемы сети на рис. 1. Результаты расчетов значений практических минимумов потерь активной мощности в схеме, полученные при решении задачи оптимизации точек нормального размыкания сети для каждого часа суток, показаны в табл. 6.

Таблица 6

**Практические минимумы относительных потерь активной мощности
в схеме рис. 5 по часам суток**

**Practical minimums of the relative active power losses
in the circuit of fig. 5 according to the hours of the day**

Часы суток	Загрузка сети S , кВт·А	Положение разреза в магистрали схемы		Относительные потери активной мощности, кВт/(кВт·А)
		1–6	2–24	
0	260,00	1–2	2–22	0,0304
1	171,65	1–2	2–22	0,0384
2	102,84	1–2	22–24	0,0573
3	80,00	5–6	–	0,0714
4	65,43	5–6	–	0,0865
5	60,12	5–6	–	0,0936
6	53,65	1–2	2–22	0,1044
7	67,02	3–4	–	0,0851
8	96,01	3–4	–	0,0622
9	152,02	3–4	–	0,0447
10	258,16	1–2	2–22	0,0366
11	418,56	1–2	2–22	0,0402
12	595,03	1–2	2–22	0,0556
13	461,21	1–2	2–22	0,0412
14	414,63	3–4	–	0,0357
15	382,93	1–2	2–22	0,0379
16	422,46	1–2	2–22	0,0439
17	509,87	1–2	2–22	0,0508
18	362,32	1–2	2–22	0,0364
19	297,72	1–2	22–24	0,0319
20	248,00	4–5	–	0,0325
21	198,07	1–2	2–22	0,0352
22	138,64	4–5	–	0,0446
23	189,55	1–2	2–22	0,0301
Наименьшее				0,0301
Среднее				0,0511
Наибольшее				0,1044

Разброс значений практических минимумов относительных потерь активной мощности в схеме по данным табл. 6 составляет 0,0743, а среднее

значение 0,0511. Значение теоретического минимума относительных потерь активной мощности $\Delta P_{\min}^T$ в анализируемой схеме составляет

$$\Delta P_{\min}^T = \frac{2\sqrt{\Delta P_x r_3}}{U} = \frac{2 \cdot \sqrt{5,49 \cdot 10^{-3} \cdot 2,98}}{10} = 0,0256.$$

Допустимое отклонение режима сети $\delta P_{\min}$ от точки теоретического минимума относительных потерь активной мощности при нормальных изменениях режимных параметров

$$\delta P_{\min} = k \Delta P_{\min \text{ нб}}^T - \Delta P_{\min}^T = 0,9 \cdot 0,1044 - 0,0256 = 0,0684,$$

где k – понижающий коэффициент запаса (принятый равным 10 %); $\Delta P_{\min \text{ нб}}^T$ – верхняя оценка диапазона практических минимумов относительных потерь активной мощности при нормальных изменениях режимных параметров сети; $\Delta P_{\min}^T$ – значение теоретического минимума относительных потерь активной мощности в схеме сети.

Это означает, что если в условиях SMART GRID относительные потери активной мощности в схеме сети, представленной на рис. 5, превышают величину, равную сумме

$$\Delta P_{\min}^T + \delta P_{\min} = 0,0256 + 0,0684 = 0,0940,$$

то должна осуществляться выработка соответствующих управляющих воздействий, направленных на приведение сети в новое оптимальное состояние.

Исследования 38 схем городских распределительных электрических сетей разной конфигурации и объема позволили уточнить величину допустимого отклонения режима сети от точки теоретического минимума относительных потерь активной мощности при нормальных изменениях режимных параметров. Уточненное по данным исследований значение допустимого отклонения составляет 0,0711.

ВЫВОДЫ

1. Традиционно рассчитываемые режимные параметры в условиях SMART GRID становятся наблюдаемыми, поэтому большинство задач управления режимами, характерными для городских распределительных электрических сетей традиционного исполнения, в условиях SMART GRID теряют свою актуальность.
2. Насыщение в условиях SMART GRID городских электрических сетей распределенными источниками малой генерации, оснащенными системами автоматического регулирования напряжения и мощности, требует развития методов их электрических расчетов и оптимизации.
3. Предложены методика и алгоритм определения мест оптимального размыкания городских распределительных электрических сетей с учетом распределенных источников малой генерации.
4. Определены границы допустимых отклонений режимов городских распределительных электрических сетей в условиях SMART GRID от точки теоретического минимума относительных потерь активной мощности при нормальных изменениях режимных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по автоматизации распределительных электрических сетей 0,4–10 (6) кВ Белорусской энергосистемы: СТП 09110.47.104–11: стандарт ГПО «Белэнерго». Минск: Белэнерго, 2011. 36 с.
 2. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
 3. Савина, Н. В. Инновационное развитие электроэнергетики на основе технологий SMART GRID / Н. В. Савина. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. 136 с.
 4. Фурсанов, М. И. Оптимальные технические потери электроэнергии в силовых трансформаторах распределительных электрических сетей / М. И. Фурсанов // Энергетическая стратегия. 2016. Т. 50, № 2. С. 42–45.
 5. Фурсанов, М. И. Оптимальные технические потери электроэнергии в распределительных электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов // Энергетическая стратегия. 2016. Т. 51, № 3. С. 44–47.
 6. Методические принципы расчета и анализа разомкнутых электрических сетей с несколькими источниками питания / М. И. Фурсанов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 3. С. 5–13.
 7. Фурсанов, М. И. Учет потребительских энергоисточников в расчетах распределительных электрических сетей 6–10 кВ / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 4. С. 11–15.
 8. SMART GRID или умные сети электроснабжения [Электронный ресурс] // Энэка. Инженерно-консалтинговая компания. Режим доступа: http://www.eneka.by/ru_smartgrid0/. Дата доступа: 02.03.2016.
 9. Интеллектуальные электрические сети в России – предпосылки [Электронный ресурс] // Умные сети и интеллектуальные энергетические системы. Режим доступа: <http://venture-biz.ru/energetika-energoberezhenie/290-intellektualnye-seti>. Дата доступа: 02.03.2016.
- Поступила 04.05.2017 Подписана в печать 20.07.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Enterprise Standard 09110.47.104–11. Guidelines for the Automation of Distribution Electrical Networks of 0.4–10 (6) kV of the Belarusian Energy System. Minsk, Belenergo. 36 (in Russian).
2. Kobets B. B., Volkova I. O. (2010) *Innovative Development of Power Industry on the Basis of the SMART GRID Concept*. Moscow, Energiya Publ. 208 (in Russian).
3. Savina N. V. (2014) *Innovative Development of Power Generation Based on SMART GRID Technologies*. Blagoveshchensk, Amur State Univ. 136 (in Russian).
4. Fursanov M. I. (2016) Optimal Technical Power Losses in Power Transformers of Distributive Electrical Networks. *Energeticheskaya Strategiya = Energy Strategy*, 50 (2), 42–45 (in Russian).
5. Fursanov M. I. (2016) Optimal Technical Electric Power Losses in Distributive Electric Networks of Power Systems. *Energeticheskaya Strategiya = Energy Strategy*, 51 (3), 44–47 (in Russian).
6. Fursanov M. I., Zolotoy A. A., Makarevich V. V., Moukha A. N. (2009) Methodical Principles of Calculation and Analysis of Opened Power Network with Several Power Supply Sources. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 5–13 (in Russian).
7. Fursanov M. I., Zolotoy A. A., Makarevich V. V. (2011) Account of Consumer Power Sources in Calculations of Distributive Electrical Networks of 6–10 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 11–15 (in Russian).
8. SMART GRID or the Smart Grids of Energy Supply. *Eneka. Engineering and Consulting Company*. Available at: http://www.eneka.by/ru_smartgrid0/ (Accessed: 2 March 2016) (in Russian).
9. Smart Grids in Russia: the Prerequisites. *Smart Grids and Intelligent Energy Systems*. (2011, 15.09). Available at: <http://venture-biz.ru/energetika-energoberezhenie/290-intellektualnye-seti> (Accessed: 2 March 2016) (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35

УДК 621.311

Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии

И. В. Жежеленко¹⁾

¹⁾Приазовский государственный технический университет (Мариуполь, Украина)

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

Реферат. Сформулированы основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии. Установлена связь между значением потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям различных стран с уровнем экономики этих государств, характеризующаяся значением внутреннего валового продукта по паритету покупательной способности на душу населения. В странах с валовым внутренним продуктом по паритету покупательной способности на душу населения менее 20 тыс. дол. США потери электроэнергии при ее транспорте в электрических сетях в 1,5–2,5 раза больше, чем в электрических сетях промышленно развитых государств, где указанный паритет покупательной способности лежит в пределах 30,4–54,5 тыс. дол. В странах с более развитой экономикой выше техническая культура производства, передачи и распределения электроэнергии, используются современные системы управления режимами работы электрических сетей, контроля и учета электроэнергии, живут и работают платежеспособные и дисциплинированные потребители, действуют четкая нормативно-правовая база и система тарифного регулирования. Однако процесс передачи и распределения электроэнергии эффективен, если выполняется не только минимум относительных потерь, но и обеспечиваются нормальные (договорные) требования по пропускной способности, качеству и надежности электроснабжения. Рассмотрена возможность аналитического определения оптимального значения резервной мощности на электростанциях, обеспечивающая требуемый уровень надежности энергосистемы.

Ключевые слова: эффективность, производство, передача и распределение электроэнергии, относительные потери электроэнергии, индекс надежности энергосистем

Для цитирования: Жежеленко, И. В. Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии / И. В. Жежеленко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 28–35. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35

Адрес для переписки

Жежеленко Игорь Владимирович
Приазовский государственный
технический университет
ул. Университетская, 7
87500, г. Мариуполь, Украина
Тел.: +380 629 44-65-51
epp@pstu.edu

Address for correspondence

Zhezhelenko Igor V.
Pryazovskyi State
Technical University
7 University str.,
87500, Mariupol, Ukraine
Tel.: +380 629 44-65-51
epp@pstu.edu

The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy

I. V. Zhezhelenko¹⁾

¹⁾Pryazovskyi State Technical University (Mariupol, Ukraine)

Abstract. The main directions of increase of efficiency of production, transmission and distribution of electric energy have been formulated. The relation between the values of electricity losses during transmission via power grids of different countries and the level of the economies of these countries characterized by the value of gross domestic product at purchasing power parity per capita has been established. In the countries with a gross domestic product at purchasing power parity per capita less than 20 thousand US dollars electricity losses during its transmission via power grids are 1.5–2.5 times more than the ones transmitted via power grids of the industrialized countries where the specified purchasing power parity is in the range of 30.4–54.5 thousand US dollars. In the countries with more developed economies the technical culture of production, transmission and distribution of electricity is higher; the modern control systems of operation modes of electrical networks are used as well as of monitoring and accounting of electricity; also there are solvent and disciplined consumers in such countries as well as clear regulatory framework and tariff regulation system. However, the process of transmission and distribution of electricity is effective if not only low relative losses take place, but the normal (contractual) requirements for carrying capacity, quality and reliability of electricity supply are provided. The possibility of analytical determination of the optimum value of reserve capacity of power plants providing the required level of reliability of the power system has been considered.

Keywords: efficiency, production, transmission and distribution of electric power, relative power losses, reliability index of power systems

For citation: Zhezhelenko I. V. (2018) The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 28–35. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35 (in Russian)

Введение

Повышение эффективности производства, передачи и распределения электроэнергии было и остается одной из важнейших проблем современной энергетики. В круг вопросов этой комплексной проблемы входят такие составляющие, как снижение технологических потерь электроэнергии, повышение качества и надежности функционирования электрических сетей и систем, анализ и коррекция действующих в настоящее время нормативов.

Процесс передачи и распределения электроэнергии эффективен, если выполняется не только минимум относительных потерь, но и обеспечиваются нормальные (договорные) требования по пропускной способности, качеству и надежности электроснабжения.

В настоящее время более 70 % электроэнергии поступает в сеть в преобразованном виде (в металлургии – более 90 %), поэтому наблюдаются возрастание уровней электромагнитных потерь, их отрицательное влияние на системы управления, контроля и сигнализации и ухудшение электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики [1–6].

Для нормализации качества электроэнергии также необходима минимизация кондуктивных помех, в первую очередь высших гармоник, несимметрии и колебаний напряжения.

Относительные потери электроэнергии в электрических сетях

Значения относительных потерь электроэнергии в электрических сетях промышленно развитых стран по усредненным данным за 2013–2015 гг. находятся в пределах 4–7 %. Так, в Германии – 4 %; во Франции – 7; в Австрии, Бельгии, Чехии – 5; США – 6; Италии, Швейцарии и Японии – 7 %. Эти государства обладают высоким значением внутреннего валового продукта (ВВП) по паритету покупательной способности (ППС) на душу населения, превышающим 20 тыс. дол. США: США – 54,5 тыс. дол., Австрия и Германия – 46,5, Италия – 35,4, Франция – 40,7 тыс. дол. Оценка факторов, влияющих на энергоэффективность систем электроснабжения при валовом внутреннем продукте более и менее 20 тыс. дол., приведена в табл. 1, 2.

Таблица 1

Оценка факторов, влияющих на энергоэффективность систем электроснабжения при ВВП более 20 тыс. дол.

Evaluation of factors influencing the energy efficiency of power supply systems of the countries with a GDP of more than 20 thousand US dollars

Страна	ВВП, тыс. дол.	Потери электроэнергии при передаче и распределении, %	Потребление электроэнергии на душу населения, тыс. кВт·ч
Австрия	46,5	5	8,5
Бельгия	43,1	5	8,0
Германия	46,3	4	7,0
Нидерланды	48,3	4	6,8
Соединенные Штаты	54,5	6	13,0
Чехия	30,4	5	6,3
Япония	37,5	5	7,8
Италия	35,4	7	5,2
Франция	40,7	7	7,4
Российская Федерация	26,7	10	6,5

В то же время в странах с ВВП по ППС менее 20 тыс. дол. (Молдове, Беларуси, Румынии, Монголии) относительные потери в сетях превосходят 10 %. Фактические потери в электрических сетях Беларуси и Украины в 1,5–2,5 раза больше, чем в электрических сетях промышленно развитых стран.

Таблица 2

Оценка факторов, влияющих на энергоэффективность систем электроснабжения при ВВП менее 20 тыс. дол.

Evaluation of factors influencing the energy efficiency of power supply systems of the countries with a GDP of less than 20 thousand US dollars

Страна	ВВП, тыс. дол.	Потери электроэнергии при передаче и распределении, %	Потребление электроэнергии на душу населения, тыс. кВт·ч
Армения	8,2	12	1,90
Молдова	5,0	25	1,35
Монголия	11,9	15	1,90
Беларусь	18,3	11	3,60
Украина	8,7	11	3,60
Румыния	19,8	12	2,50

Из приведенных цифр следует, что имеет место связь значений потерь электроэнергии в электрических сетях различных стран с уровнем экономики этих государств. В странах с более развитой экономикой, как правило, выше техническая культура производства, передачи и распределения электроэнергии, используются современные системы управления режимами работы электрических сетей, контроля и учета электроэнергии, живут и работают платежеспособные и дисциплинированные потребители, действуют четкая нормативно-правовая база и система тарифного регулирования. Следует отметить, что простое сравнение относительных потерь электроэнергии в электрических сетях без анализа этих потерь в сопоставимых условиях по протяженности сетей, их структуре, их загрузке, режимам работы и т. п. не всегда корректно. К сожалению, такой анализ в настоящее время никем не проводится, хотя был бы весьма полезным для изучения и применения передового опыта.

Высокий уровень потерь в электрических сетях связан с низким уровнем компенсации реактивной мощности, физическим и моральным износом сети, недостаточным использованием средств оптимизации режимов работы и регулирования напряжения и нерешенности проблем качества электрической энергии.

Низкий уровень качества электрической энергии приводит к значительному снижению энергетической эффективности электрических сетей за счет увеличения потерь активной и реактивной мощностей, технологического расхода электроэнергии на ее транспорт, к снижению срока службы электрооборудования, увеличению капитальных вложений в электрические сети, нарушению условий нормального функционирования энергетической системы [7–9].

В настоящее время нет необходимости доказывать значимость проблемы качества электроэнергии. Она относится к числу важнейших проблем современной электроэнергетики и является частью проблемы повышения энергоэффективности электрических сетей.

Непрерывный рост установленной мощности нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок не всегда сопровождался своевременным внедрением решений, направленных на коррекцию качества электроэнергии, даже в промышленно развитых странах Западной Европы. Так, в распределительных сетях напряжением 230/400 В в Швейцарии за десятилетний период содержание высших гармоник (ВГ) возросло на 0,7 %. Поэтому требования стандартов на качество электроэнергии в промышленных электрических сетях, по нашим данным, соблюдаются в 30–40 % случаев.

При превышении нормируемых уровней возможно не только нарушение помехоустойчивости технических средств в энергосистеме, на электростанциях и подстанциях, но и технологических процессов в системах электроснабжения.

Сегодня более 60 % электрической энергии в промышленности используется в преобразованном виде (в металлургии на некоторых производствах до 100 %). Экспертные оценки, выполненные нами, позволяют оценить влияние электромагнитных помех следующим образом. Применительно к СНГ в его нынешних географических пределах ущерб, связанный

с влиянием помех, достигает 10–12 % от всего ущерба. Коррекция этих помех требует разработки широкого класса специальных электромагнитных устройств. Электромагнитные помехи обуславливают нагрев токоведущих частей электрооборудования, вызывают сбои и нарушения в работе цепей управления, ухудшают работу устройств автоматики и связи. Это приводит также к ухудшению состояния изоляции электрооборудования и в ряде случаев – к преждевременному выходу его из строя, ухудшению экономических показателей и в целом энергетической эффективности электрических сетей. Этому способствует в значительной мере внедрение частотных преобразователей в системах электропривода. Как следствие, не только существенно возрастает уровень канонических ВГ, но и появляется широкий спектр так называемых интергармоник (ИГ) – межгармоник. В последние годы заметно увеличился выход из строя электродвигателей вследствие повреждения изоляции (до 20–25 %), из-за значительного повышения уровня несинусоидальности. Так, эквивалентное действующее значение ИГ непосредственных преобразователей частоты может в зависимости от режима работы в несколько раз превосходить их номинальные значения (на основной частоте); преобразователь со звеном постоянного тока генерирует ВГ и ИГ в меньшей степени.

Практика свидетельствует о том, что в этом случае стоимость мероприятий по компенсации уровней ВГ может быть соизмеримой или больше стоимости ущерба от воздействия ВГ и ИГ. Высокие уровни ВГ и ИГ усложняют решение ряда вопросов концепции Smart Grid.

Оценка индекса надежности энергосистем

Как известно, одним из важнейших показателей энергетической эффективности является индекс надежности электроснабжения.

В энергообъединениях СНГ значение индекса надежности находится в диапазоне 0,996. Зарубежные нормативы надежности, отвечающие современному состоянию энергетики, достаточно высоки: в США – 0,9997, во Франции – 0,9997, в Нидерландах – 0,9995, в Ирландии – 0,9991, в Скандинавских странах – 0,999. Переход на более высокий уровень надежности потребует затрат $K_{\text{жел}}$ в размере

$$K_{\text{жел}} = K \left(\frac{\lg p}{\lg p_{\text{жел}}} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

где $K_{\text{жел}}$ – капиталовложения для достижения желаемого уровня индекса надежности $p_{\text{жел}}$; K – капитальные затраты, при которых обеспечивается индекс надежности p ; $\alpha > 1$ – показатель степени.

При $p = 0,996$ и $p_{\text{жел}} = 0,9998$ $K_{\text{жел}} = K(1,9)^{\alpha}$, т. е. требуется увеличение затрат не менее чем в 1,9 раза.

Оценочные расчеты показали, что для обеспечения более высокого уровня надежности необходимы затраты в размере 0,1–0,2 тыс. дол./год на 1 МВт нагрузки.

Рассмотрим возможность аналитического определения оптимального значения резервной мощности на электростанциях, обеспечивающей тре-

буемый уровень надежности работы энергосистемы. При увеличении резервной мощности повышаются затраты на сооружение электростанций и снижаются расходы (ущерб) от вероятного недоотпуска электроэнергии потребителям, т. е. приведенные затраты можно представить в виде [10]

$$З = EK + a(p_a + p_{т.о} + p_k)K + Y = K(E + a(p_a + p_{т.о} + p_k)) + Y, \quad (2)$$

где E – коэффициент эффективности капитальных вложений K ; a – то же, учитывающий долю расхода топлива на работу резервной мощности, может быть принят равным 1,0–3,0; $p_a, p_{т.о}, p_k$ – доля отчислений от капитальных затрат на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание, капитальный ремонт; Y – ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям.

Так как с ростом резервной мощности $P_{рез}$ значение K возрастает, а Y снижается, то можно записать:

$$K = k_{уд} P_{рез}; \quad (3)$$

$$Y = z + \frac{v}{P_{рез}}, \quad (4)$$

где $k_{уд}$ – удельная стоимость 1 кВт установленной резервной мощности на электростанциях, в настоящее время $k_{уд} \approx 3000$ дол./кВт на атомных электростанциях; z – составляющая, учитывающая долю ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям, не зависящая от значения $P_{рез}$, руб.; v – составляющая ущерба, зависящая от изменения $P_{рез}$, руб.·кВт.

Подставив значения (3) и (4) в (2), получим

$$З = k_{уд} P_{рез} (E + a(p_a + p_{т.о} + p_k)) + z + \frac{v}{P_{рез}}. \quad (5)$$

Из (5) найдем оптимальное значение $P_{рез}$. Для этого возьмем первую производную $dЗ/dP_{рез}$ и приравняем ее к нулю

$$\frac{dЗ}{dP_{рез}} = k_{уд} (E + a(p_a + p_{т.о} + p_k)) - \frac{v}{P_{рез}^2} = 0.$$

Откуда

$$P_{рез} = \sqrt{\frac{v}{k_{уд} (E + a(p_a + p_{т.о} + p_k))}}. \quad (6)$$

Рассмотрим пути определения значения v . Разделим левые и правые части выражения (4) на Y и получим

$$1 = \frac{z}{Y} + \frac{v}{P_{рез} Y} = x_1 + a_1 x_2, \quad (7)$$

где $x_1 = \frac{z}{Y}$; $a_1 = \frac{v}{P_{рез} Y}$; $x_2 = \frac{1}{Y}$; $a_1 = \frac{1 - x_1}{x_2}$.

Если $x_1 = 1, 0$, то $a_1 = 0$, $a_1 x_2 = 0$ и $z = Y = P_{\text{рез}} T q_{\text{деф}} y_a$, где T – расчетный период или период наблюдения, принимается равным числу часов в году, т. е. 8760 ч; $q_{\text{деф}}$ – вероятность дефицита мощности значением $P_{\text{рез}}$; y_a – удельный системный ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям при отсутствии аварийного резерва мощности, в настоящее время лежит в пределах 3–50 дол./кВт·ч).

Если $x_1 = 0$, то $a_1 = \frac{1}{x_2}$ и $\frac{v}{P_{\text{рез}}} = Y$.

Тогда

$$v = P_{\text{рез}} Y. \quad (8)$$

Если $0 < x_1 < 1$, то $a_1 > 0$ и $\frac{v}{P_{\text{рез}}} = (1 - x_1) Y$ или $v = (1 - x_1) Y P_{\text{рез}}$.

Подставим значения v в формулу (6) и получим

$$P_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{(1 - x_1) P_{\text{рез}}^2 T q_{\text{деф}} y_a}{k_{\text{уд}} (E + a(p_a + p_{\text{т.о}} + p_{\text{к}}))}}.$$

Отсюда вероятность дефицита мощности

$$q_{\text{деф}} = \frac{k_{\text{уд}} (E + a(p_a + p_{\text{т.о}} + p_{\text{к}}))}{(1 - x_1) T y_a}.$$

Для обеспечения $q_{\text{деф}} = 0,001$ или $P_{\text{жел}} = 0,999$ необходимо при $E + a(p_a + p_{\text{т.о}} + p_{\text{к}}) = 0,4$; $x_1 = 0,1$; $y_a = 50$ дол./кВт·ч; $T = 8760$ ч иметь значение $k_{\text{уд}}$ не больше 1000 дол./кВт.

Применение высоких капиталовложений должно обеспечить повышение надежности всех компонентов электроэнергетических систем, использующих мощность магистральных и распределительных электрических сетей, инвестиций в обеспечение устройств противоаварийной автоматики и др.

ВЫВОД

Для повышения энергетической эффективности требуется:

- обеспечение нормированных уровней показателя качества электроэнергии в узлах электрических сетей;
- уменьшение уровней технологических потерь электрической энергии, в частности корректное решение проблем реактивной мощности в первую очередь путем обеспечения экономически обоснованных значений коэффициента мощности и внедрения регулируемых компенсирующих устройств;
- решение вопросов определения оптимального уровня надежности электрических сетей и систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко, И. В. Электромагнитная совместимость в электрических сетях / И. В. Жежеленко, М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2012. 197 с.
2. Электромагнитная совместимость потребителей / И. В. Жежеленко [и др.]. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.
3. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. Герасименко, А. А. Передача и распределение электроэнергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов на/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. 720 с.
5. Савина, Н. В. Системный анализ электроэнергии в электрических распределительных сетях / Н. В. Савина. М.: Наука, 2008. 187 с.
6. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
7. Жежеленко, И. В. Методы вероятностного моделирования и расчета характеристик электрических нагрузок потребителей / И. В. Жежеленко, В. П. Степанов, Е. А. Коротков. Самара: СамГТУ, 2001. 196 с.
8. Короткевич, М. А. Совершенствование эксплуатации электрических сетей / М. А. Короткевич. Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2003. 372 с.
9. Поспелов, Г. Е. Передача энергии и электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. Минск: Адукацыя і выхаванне, 2003. 544 с.
10. Короткевич, М. А. Оценка значения индекса надежности энергосистем / М. А. Короткевич // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66. С. 54–59.

Поступила 18.08.2017 Подписана в печать 20.10.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V., Korotkevich M. A. (2012) *Electromagnetic Compatibility in Electrical Networks*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 197 (in Russian).
2. Zhezhelenko I. V., Shidlovskii A. K., Pivnyak G. G., Saenko Yu. L., Noiberger N. A. (2012) *Electromagnetic Compatibility of Consumers*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 351 (in Russian).
3. Zhezhelenko I. V. (2000) *Higher Harmonics in Power Supply Systems of Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 331 (in Russian).
4. Gerasimtnko A. A., Fedin V. T. (2006) *Transmission and Distribution of Electricity*. Rostov-on-Don: Fenix Publ.; Krasnoyarsk: Izdatel'skie Proekty Publ. 720 (in Russian).
5. Savina N. V. (2008) *Systematic Analysis of the Electric Power in Electric Distribution Networks*. Moscow, Nauka Publ. 187 (in Russian).
6. Barybin Y. G. (ed.), Babakhanyan I. S., Beider A. A., Geller A. V., Dushatskii B. Ya., Egorov S. I., Zhokhov B. D., Ivanov V. S., Korogodskii V. I., Krimker F. E., Kuindzhi V. B., Liberzon E. M., Menchik V. V., Miller G. R., Ryabov M. P. (1990) *Reference-Book in Design of Power Supply*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 576 (in Russian).
7. Zhezhelenko I. V., Stepanov V. P., Korotkov E. A. (2001) *Methods of Probabilistic Modeling and Calculation of Characteristics of Consumers' Electric Loads*. Samara, Samara State Technical University. 196 (in Russian).
8. Korotkevich M. A. (2003) *Improvement of Operation of Electric Networks*. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ. 372 (in Russian).
9. Pospelov G. E., Fedin V. T. (2003) *Power Transfer of Electricity Transmission*. Minsk, Adukatsyya i Vychavanne Publ. 544 (in Russian).
10. Korotkevich M. A. (2015) Evaluation of Power Systems Index Reliability Values. *Methodical Problems of Research of Reliability of Large Power Systems*. Minsk, Belarusian National Technical University, (66), 54–59 (in Russian).

Received: 18 August 2017

Accepted: 20 October 2017

Published online: 29 January 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-36-46

УДК 629.7

Использование динамических свойств спектров последовательностей радиоимпульсов для обеспечения высокой чувствительности тестового контроля обмоток асинхронных двигателей

А. А. Шейников¹⁾, Ю. В. Суходолов²⁾

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

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

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

Реферат. Анализ существующих методов тестовой диагностики обмоток асинхронных двигателей показал, что большая погрешность измерений диагностических параметров обусловлена прежде всего нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Простое увеличение чувствительности измерительной аппаратуры приводит к повышению вероятности ложного заключения о неисправности обмотки и может применяться только в совокупности с другими способами обеспечения высокого отношения сигнал/шум. В процессе исследований установлено, что прямой путь подавления неинформативных спектральных составляющих и искажений, вызванных нестабильностью параметров испытательного сигнала, является сложным и труднореализуемым. Более целесообразен выбор отдельных характерных частотных составляющих сигнала, обладающих одновременно высокой чувствительностью к изменению информативного параметра измерительного сигнала (например, времени задержки между двумя периодическими последовательностями радиоимпульсов) и низкой чувствительностью к случайным отклонениям параметров сигнала, обусловленным нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров (например, к отклонениям фазы сигнала). Причем регулируя амплитуду, период следования, длительность импульсов и время задержки импульсных последовательностей, можно математически обоснованно управлять параметрами спектра (перемещать положение нулей амплитудного спектра, изменять амплитуду спектральных составляющих). Использование динамики спектров за счет управления их параметрами позволит обеспечивать высокую чувствительность к изменению информативного параметра измерительного сигнала, характеризующего степень развития дефектов обмоток асинхронных двигателей.

Ключевые слова: динамические свойства спектра, последовательность радиоимпульсов, чувствительность к дефектам, обмотка асинхронного двигателя, тестовый контроль

Для цитирования: Шейников, А. А. Использование динамических свойств спектров последовательностей радиоимпульсов для обеспечения высокой чувствительности тестового контроля обмоток асинхронных двигателей / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 36–46. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-36-46

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

The Use of the Dynamic Properties of Spectra of Sequences of Radio Pulses to Ensure High Sensitivity of the Test Control Windings of Asynchronous Motors

A. A. Sheinikov¹⁾, Yu. V. Suchodolov²⁾

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

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

Abstract. The analysis of existing methods of diagnostics test of the windings of asynchronous motors demonstrated that a large error of measurement of diagnostic parameters is due primarily to the instability of the measuring equipment. Sole increasing the sensitivity of the measuring instrument increases the probability of a false conclusion on the faulty winding and can only be used in conjunction with other methods of ensuring high signal-to-noise ratio. During the research fulfillment it was found out that direct way of suppressing uninformative spectral components and distortions caused by the instability of parameters of the testing signal is complex and most difficult to be implemented. Thus, more appropriate is the selection of individual characteristic frequency components of the signal, which has high sensitivity to change of informative parameter of the measuring signal (for example, the time delay between two periodic sequences of pulses) and low sensitivity to random deviations in the signal due to instability in the functioning of the elements of the measuring circuits (for example, to deviation of the phase of the signal). Moreover, adjusting the amplitude, repetition period, pulse duration and delay time pulse sequences it is possible to implement a mathematically justifiable control of the parameters of the spectrum (to move the position of the zeros of the amplitude spectrum, to change the amplitude of the spectral components). The use of the dynamics of the spectra by controlling their parameters will ensure a high sensitivity to change of the informative parameter of the measuring signal, characterizing the degree of development of defects in the windings of asynchronous motors.

Keywords: dynamic properties of the spectrum, sequence of radio pulses, sensitivity to defects, winding of the asynchronous motor, test check

For citation: Sheinikov A. A., Suchodolov Yu. V. (2018) The Use of the Dynamic Properties of Spectra of Sequences of Radio Pulses to Ensure High Sensitivity of the Test Control Windings of Asynchronous Motors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 36–46. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-36-46 (in Russian)

В настоящее время при диагностике обмоток асинхронных двигателей наиболее эффективными являются методы на основе спектрального анализа тестовых сигналов. Основной недостаток этих методов – необходимость подавления в регистрируемом сигнале неинформативных спектральных составляющих и искажений, вызванных нестабильностью работы измерительной аппаратуры.

В условиях постоянного роста вычислительных возможностей средств измерений резервом повышения чувствительности методов обработки периодических измерительных сигналов представляется установление однозначной зависимости между локальными вариациями временных параметров сигнала и изменениями параметров его спектра. Вариации значений параметров сигналов приводят к нарушению исходного распределения параметров гармонических составляющих, при котором одни из них подвергаются наибольшему изменению, а другие – наименьшему. Увеличение точности и обеспечение автоматизации контроля основаны на замене малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов регистрацией изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям информативного параметра (например, времени задержки

между двумя периодическими последовательностями) и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью работы измерительной аппаратуры [1]. Так, регулируя амплитуду, период следования и длительность импульсов, можно математически обоснованно управлять параметрами спектра (перемещать положение нулей амплитудного спектра, изменять амплитуду характерных спектральных составляющих) [2]. Знание номеров характерных гармонических составляющих позволит учесть искажения сигнала, обусловленные недостаточной устойчивостью работы измерительной аппаратуры [3].

В измерительных системах в качестве измерительных сигналов наиболее широко применяются периодические последовательности радиоимпульсов [4, 5]. Так, для тестового контроля асинхронных двигателей наиболее приемлем диапазон частот радиоимпульсов 100–300 кГц.

Периодическая последовательность радиоимпульсов в литературе обычно представляется рядом Фурье [6–8]

$$e(t) = E \frac{\tau_n}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin(\omega_0 - n\Omega) \frac{\tau_n}{2}}{2(\omega_0 - n\Omega) \frac{\tau_n}{2}} + \frac{\sin(\omega_0 + n\Omega) \frac{\tau_n}{2}}{2(\omega_0 + n\Omega) \frac{\tau_n}{2}} \right] \cos(n\Omega t), \quad (1)$$

где n – номер гармонической составляющей; ω_0 – несущая частота; Ω – частота следования радиоимпульсов; τ_n – длительность радиоимпульсов.

Для определения спектрального состава последовательности радиоимпульсов предлагается воспользоваться принципом наложения и представить их в виде суммы из m задержанных по времени на T_c относительно друг друга полных периодов синусоиды. В свою очередь, синусоиду можно представить в виде положительной и отрицательной полуволн, показанных на рис. 1.

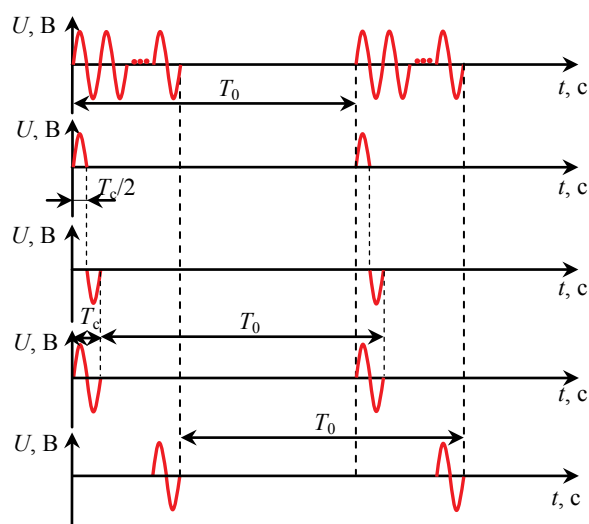


Рис. 1. Временные диаграммы последовательности радиоимпульсов

Fig. 1. Timing diagrams of the sequence of radio pulses

Комплексная амплитуда n -й гармоники полувольты определяется выражением [9]

$$U_{n/2} = \frac{2ET_c}{\pi T_0 \left(1 - n^2 \frac{T_c^2}{T_0^2}\right)} \left| \cos\left(\frac{\pi n T_c}{2T_0}\right) \right| e^{-j \frac{\pi n T_c}{2T_0}}, \quad (2)$$

где T_0 – период следования импульсов; T_c – то же синусоидального заполнения.

Складываем положительную и задержанную по времени на $t_3 = \frac{T_c}{2}$ отрицательную полувольты. Тогда комплексная амплитуда n -й гармоники суммарного сигнала в соответствии с теоремой о смещении будет равна

$$\begin{aligned} \dot{U}_{n\Sigma/2} &= \dot{U}_{n/2} - \dot{U}_{n/2} e^{-j \frac{\pi n T_c}{T_0}} = \\ &= \frac{4ET_c}{\pi T_0 \left(1 - n^2 \frac{T_c^2}{T_0^2}\right)} \left| \cos\left(\frac{\pi n T_c}{2T_0}\right) \right| \left| \sin\left(\frac{\pi n T_c}{2T_0}\right) \right| e^{-j \left(\frac{\pi n T_c}{T_0} - \frac{\pi n T_c}{2T_0} - \frac{\pi}{2}\right)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Складывая сигналы, представляющие собой последовательность одного периода синусоиды с временной задержкой каждой относительно начала координат $t_3 = (m-1)T_c$, получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{U}_{1n\Sigma/2} + \dot{U}_{2n\Sigma/2} e^{-j \frac{\pi n T_c}{T_0}} + \dot{U}_{(m-1)n\Sigma/2} e^{-j \left(\frac{\pi m n T_c}{T_0} - \frac{\pi n T_c}{2T_0} - \frac{\pi}{2}\right)} = \\ &= \frac{2ET_c}{\pi T_0 \left(1 - n^2 \frac{T_c^2}{T_0^2}\right)} \left| \sin\left(\pi m n \frac{T_c}{T_0}\right) \right| e^{-j \left(\frac{\pi m n T_c}{T_0} - \frac{\pi n T_c}{2T_0} - \frac{\pi}{2}\right)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Соответственно модуль комплексной амплитуды n -й гармоники сигнала последовательности радиоимпульсов можно рассчитать по формуле

$$|\dot{U}_n| = \frac{2ET_c}{\pi T_0 \left(1 - n^2 \frac{T_c^2}{T_0^2}\right)} \left| \sin\left(\pi m n \frac{T_c}{T_0}\right) \right|. \quad (5)$$

Определим положение нулей огибающей амплитудного спектра последовательности радиоимпульсов. Нули при $n_0 = \frac{l f_c}{m f_0}$, где $l = 1, 2, 3, \dots$

Выражение (4) позволяет рассчитать значения комплексных амплитуд n -х гармоник, кроме гармоники с номером $n = \frac{f_c}{f_0}$. Расчет значения ком-

плексной амплитуды данной гармоники осложнен тем, что существует неопределенность типа $\frac{0}{0}$, раскрывая которую по правилу Лопиталя, можно получить

$$\lim_{n \rightarrow f_c/f_0} \frac{2Ef_0 \left| \sin\left(\frac{\pi mn f_0}{f_c}\right) \right|}{\pi f_c \left(1 - n^2 \frac{f_0^2}{f_c^2}\right)} = mE \frac{f_0}{f_c} = mE \frac{T_c}{T_0}. \quad (6)$$

Это наибольший максимум огибающей амплитудного спектра последовательности радиоимпульсов.

Однако при определении спектральных составляющих следует учитывать нестабильность параметров измерительного сигнала (рис. 2).

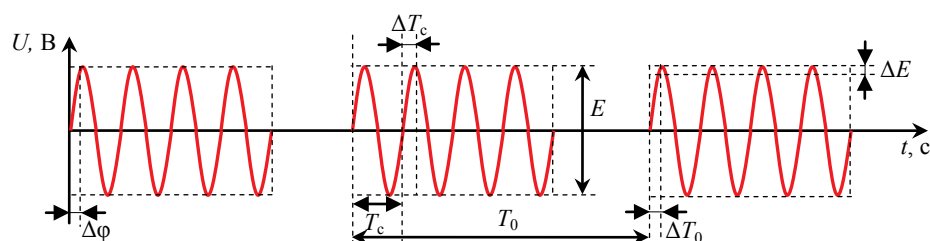


Рис. 2. Нестабильность параметров сигнала последовательности радиоимпульсов

Fig. 2. The instability of the parameters of the signal sequence of radio pulses

Например, основной причиной фазовой нестабильности параметров измерительных сигналов является запаздывание при работе генерирующей аппаратуры.

Для учета влияния фазовой нестабильности измерительного сигнала на его спектр предлагается рассмотреть самый неблагоприятный случай, при котором происходит смещение фаз крайних полувольт радиоимпульса на 90° .

Примем время включения и выключения при коммутации одинаковым. Тогда форма измерительного сигнала будет соответствовать представленной на рис. 3.

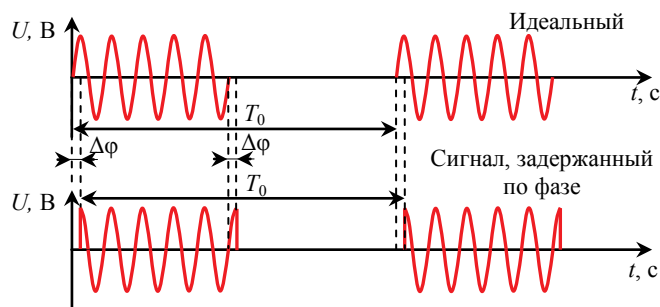


Рис. 3. Искажение фронтов радиоимпульсов, обусловленное фазовой нестабильностью

Fig. 3. The distortion of the fronts of radio pulses due to the phase instability

С целью анализа задержанный по фазе сигнал последовательности радиоимпульсов можно представить как сумму неискаженного радио-

импульса и сигнала, представляющего собой знакопеременную последовательность четвертей синусоиды, соответствующих по времени переднему и заднему фронтам каждого радиоимпульса (рис. 4).

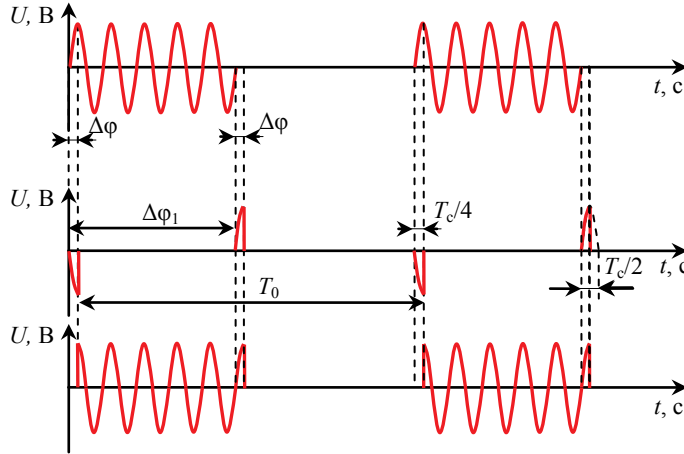


Рис. 4. Представление задержанного по фазе сигнала последовательности радиоимпульсов

Fig. 4. Representation of the phase-delayed signal of the sequence of radio pulses

При использовании принципа наложения следует учесть, что и сам добавочный сигнал может быть представлен суммой двух более простых задержанных относительно друг друга разнополярных периодических сигналов, что облегчает аналитическое описание спектра результирующего сигнала.

Таким образом, результирующий сигнал представляет собой сумму трех периодических сигналов: неискаженного радиоимпульса и двух разнополярных периодических последовательностей импульсов в виде четвертей синусоиды, сдвинутых относительно друг друга по фазе на $\Delta\varphi_1 = mT_c$.

Получим выражение для расчета спектра результирующего сигнала (спектра периодической последовательности радиоимпульсов с фазовой погрешностью). Для этого вначале рассмотрим периодическую последовательность отрицательных импульсов в виде четвертей синусоиды. Комплексную амплитуду n -й гармоники рассматриваемого сигнала можно рассчитать по формуле

$$\dot{U}_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{\frac{T_c}{4}} (-1) \sin\left(\frac{2\pi}{T_c} t\right) e^{-jn\frac{2\pi}{T_0} t} dt. \quad (7)$$

Воспользовавшись таблицей интегралов, получим

$$\dot{U}_n = -\frac{2}{T_0} \left[\frac{\left(-j\frac{2\pi n}{T_0} \right) \sin\left(\frac{2\pi}{T_c} t\right) - \left(\frac{2\pi}{T_c}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T_c} t\right)}{\left(-j\frac{2\pi n}{T_0} \right)^2 + \left(\frac{2\pi}{T_c}\right)^2} e^{-jn\frac{2\pi}{T_0} t} \right]_0^{\frac{T_c}{4}}. \quad (8)$$

После всех преобразований конечное выражение для расчета комплексной амплитуды n -й гармоники сигнала периодической последовательности отрицательных импульсов в виде четвертой синусоиды имеет вид

$$\dot{U}_n = \frac{T_0 T_c}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \left(\sin\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right) - 1 \right) + j \frac{n T_c^2}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \cos\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right). \quad (9)$$

Соответственно модуль комплексной амплитуды n -й гармоники сигнала периодической последовательности отрицательных импульсов в виде четвертой синусоиды можно рассчитать по формуле

$$|\dot{U}_n| = \sqrt{\left(\frac{T_0 T_c}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \left(\sin\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right) - 1 \right) \right)^2 + \left(\frac{n T_c^2}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \cos\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right) \right)^2}. \quad (10)$$

Или с учетом преобразований

$$|\dot{U}_n| = \frac{T_c T_0}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \sqrt{\left(\sin\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right) - 1 \right)^2 + \frac{n^2 T_c^2}{T_0^2} \cos^2\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right)}. \quad (11)$$

Учтем, что для получения спектра сигнала суммы из двух периодических последовательностей радиоимпульсов, задержанных относительно друг друга на время t_3 , необходимо умножить функцию спектральной плотности исходного одиночного однополярного сигнала на $2 \left| \sin\left(\frac{n \Omega t_3}{2}\right) \right|$,

где $\Omega = \frac{2\pi}{T_0}$ – частота периодизации; n – номер гармонической составляющей [9]. Причем $t_3 = m T_c$.

Тогда модуль комплексной амплитуды n -й гармоники сигнала периодической последовательности разнополярных импульсов в виде четвертой синусоиды, сдвинутых относительно друг друга, можно рассчитать по формуле

$$|\dot{U}_n| = \frac{2 T_c T_0}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \left| \sin\left(\frac{\pi n m T_c}{T_0}\right) \right| \sqrt{\left(\sin\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right) - 1 \right)^2 + \frac{n^2 T_c^2}{T_0^2} \cos^2\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right)}. \quad (12)$$

Таким образом, конечное выражение для расчета комплексной амплитуды n -й гармоники искаженного сигнала имеет вид

$$\begin{aligned} |\dot{U}_n| = & \frac{2 E T_c}{\pi T_0 \left(1 - n^2 \frac{T_c^2}{T_0^2} \right)} \left| \sin\left(\pi m n \frac{T_c}{T_0}\right) \right| + \\ & + \frac{2 T_c T_0}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \left| \sin\left(\frac{\pi n m T_c}{T_0}\right) \right| \sqrt{\left(\sin\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right) - 1 \right)^2 + \frac{n^2 T_c^2}{T_0^2} \cos^2\left(\frac{\pi n T_c}{2 T_0}\right)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Или с учетом преобразований

$$|\dot{U}_n| = \frac{2T_c T_0}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \times \left(\frac{E(T_0^2 + n^2 T_c^2)}{T_0^2 - n^2 T_c^2} + \sqrt{\left(\sin\left(\frac{\pi n T_c}{2T_0}\right) - 1 \right)^2 + \frac{n^2 T_c^2}{T_0^2} \cos^2\left(\frac{\pi n T_c}{2T_0}\right)} \right) \left| \sin\left(\pi m n \frac{T_c}{T_0}\right) \right|. \quad (14)$$

Сравним спектры неискаженного сигнала периодической последовательности радиоимпульсов и сигнала периодической последовательности радиоимпульсов с фазовой погрешностью (рис. 5).

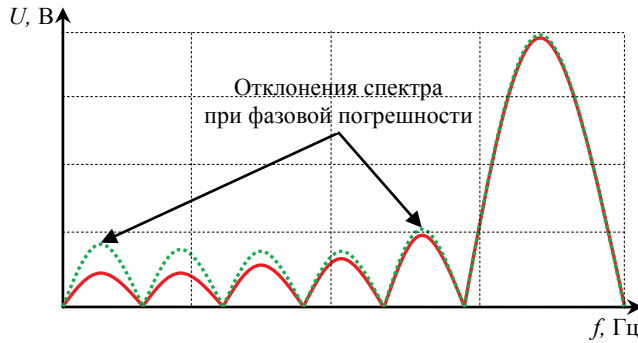


Рис. 5. Спектры сигналов периодической последовательности радиоимпульсов неискаженного и с фазовой погрешностью

Fig. 5. Spectra of signals in a periodic sequence of radio pulses the undistorted one and the phase error one

Из рис. 5 видно, что фазовая погрешность стремится к нулю с приближением к несущей частоте и увеличивается при удалении от нее.

Рассмотрим спектры неискаженного и искаженного (фазовая погрешность) сигнала двух задержанных периодических последовательностей радиоимпульсов. С учетом (5) и (14) эти спектры можно описать выражениями (15), (16) соответственно:

$$|\dot{U}_n| = \frac{2ET_c}{\pi T_0 \left(1 - n^2 \frac{T_c^2}{T_0^2}\right)} \left| \sin\left(\pi m n \frac{T_c}{T_0}\right) \right| \left| \cos\left(\frac{\pi n t_3}{T_0}\right) \right|; \quad (15)$$

$$|\dot{U}_n| = \frac{2T_c T_0}{\pi(n^2 T_c^2 + T_0^2)} \left(\frac{E(T_0^2 + n^2 T_c^2)}{T_0^2 - n^2 T_c^2} + \sqrt{\left(\sin\left(\frac{\pi n T_c}{2T_0}\right) - 1 \right)^2 + \frac{n^2 T_c^2}{T_0^2} \cos^2\left(\frac{\pi n T_c}{2T_0}\right)} \right) \times \left| \sin\left(\pi m n \frac{T_c}{T_0}\right) \right| \left| \cos\left(\frac{\pi n t_3}{T_0}\right) \right|. \quad (16)$$

Сравним спектры неискаженного и искаженного сигналов двух задержанных периодических последовательностей радиоимпульсов (значение времени задержки примем $t_3 = 0,05$ с) (рис. 6).

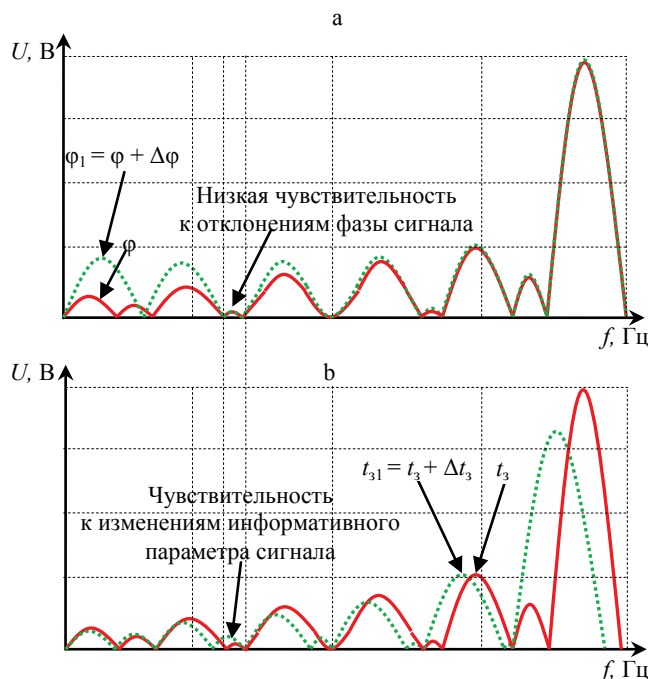


Рис. 6. Спектры неискаженного (а) и искаженного (б) сигналов двух задержанных периодических последовательностей радиоимпульсов при различных значениях времени задержки

Fig. 6. Spectra of the undistorted (a) and distorted (b) signals of the two delayed periodic sequence of radio pulses at different values of time delay

На рис. 6 наглядно показано, что увеличение отношения сигнал/шум можно получить за счет обоснованного выбора характерных частотных составляющих сигнала, обладающих одновременно высокой чувствительностью к изменению информативного параметра измерительного сигнала (например, времени задержки между двумя периодическими последовательностями радиоимпульсов t_3) и низкой чувствительностью к случайным отклонениям параметров сигнала, обусловленным нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров (например, к отклонениям фазы сигнала).

Динамические особенности спектра сигнала суммы задержанных последовательностей радиоимпульсов можно исследовать путем анализа частных производных выражения (16)

$$\Delta U_{nE f_0 f_c} = \frac{d|U_n|}{dE} \Delta E + \frac{d|U_n|}{df_0} \Delta f_0 + \frac{d|U_n|}{df_c} \Delta f_c + \frac{d|U_n|}{dt_3} \Delta t_3, \quad (17)$$

где ΔE , Δf_0 , Δf_c , Δt_3 – изменения параметров E , f_0 , f_c , t_3 соответственно.

Частные производные в (17) можно рассчитать по формулам:

$$\frac{d|U_n|}{dE} = \frac{2Ef_0 \left| \sin\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right) \right|}{\pi f_c \left(1 - n^2 \frac{f_0^2}{f_c^2}\right)}, \quad (18)$$

$$\frac{d|U_n|}{df_0} = \frac{2Ef_0 \left| \sin\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right) \right|}{\pi f_c \left(1 - n^2 \frac{f_0^2}{f_c^2}\right)} \times$$

$$\times \left[1 + \pi mn \frac{f_0}{f_c} \frac{\cos\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right)}{\left| \sin\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right) \right|} \operatorname{sign}\left(\left| \sin\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right) \right|\right) + \frac{2n^2 f_0^2}{|f_c^2 - n^2 f_0^2|} \operatorname{sign}\left(1 - n^2 \frac{f_0^2}{f_c^2}\right) \right];$$

$$\frac{d|U_n|}{df_c} = \frac{2Ef_0 \left| \sin\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right) \right|}{\pi f_c^2 \left(1 - n^2 \frac{f_0^2}{f_c^2}\right)} \left[1 + \pi mn \frac{f_0}{f_c} \frac{\cos\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right)}{\left| \sin\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right) \right|} \operatorname{sign}\left(\sin\left(\pi mn \frac{f_0}{f_c}\right)\right) + \frac{2n^2 f_0^2}{|f_c^2 - n^2 f_0^2|} \operatorname{sign}\left(1 - n^2 \frac{f_0^2}{f_c^2}\right) \right]; \quad (20)$$

$$\frac{d|U_n|}{dt_3} = \frac{2ET_c}{\pi T_0 \left(1 - n^2 \frac{T_c^2}{T_0^2}\right)} \left| \sin\left(\pi mn \frac{T_c}{T_0}\right) \right| \operatorname{sign}\left(\sin\left(\frac{\pi nt_3}{T_0}\right)\right) \cos\left(\frac{\pi nt_3}{T_0}\right). \quad (21)$$

Анализ выражений (18)–(21) показал, что настройкой параметров сигнала можно добиться совпадения области минимальной чувствительности к ΔE , Δf_0 , Δf_c с областью максимальной чувствительности к Δt_3 . Это позволит обеспечить высокую чувствительность амплитуды регистрируемой гармоники к Δt_3 при значительном снижении влияния ΔE , Δf_0 и Δf_c при проведении измерений.

ВЫВОД

Использование динамических особенностей спектров последовательностей радиоимпульсов позволяет получать информацию об изменениях параметров импульсов в виде, наиболее пригодном для обеспечения измерений информативного параметра с наименьшей погрешностью. А это в свою очередь открывает возможность совершенствования алгоритмического обеспечения систем диагностирования обмоток асинхронных двигателей с целью увеличения их чувствительности к дефектам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суходолов, Ю. В. Повышение помехоустойчивости контроля межвитковой изоляции коллекторных электрических машин постоянного тока с помощью волновых затухающих колебаний / Ю. В. Суходолов, А. А. Шейников, А. Н. Малашин // Сборник научных статей Военной академии Республики Беларусь. 2010. № 19. С. 67–72.
2. Шейников, А. А. Измерение малых изменений параметров импульсных последовательностей / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов, А. Е. Каледа // Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2016. № 1. С. 153–158.
3. Шейников, А. А. Совершенствование метода импульсного контроля обмоток авиационных коллекторных генераторов постоянного тока / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. 2013. № 1. С. 24–32.
4. Гутников, В. С. Фильтрация измерительных сигналов / В. С. Гутников. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 192.
5. Ревин, В. Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: в 5 ч. / В. Т. Ревин. Минск: БГУИР, 2002. Ч. 1. 70 с.
6. Спектральный (частотный) метод анализа электрических цепей / А. Н. Малашин [и др.]. Минск: ВАРБ, 2015. 95 с.
7. Мирский, Г. Я. Измерение временных интервалов / Г. Я. Мирский. М.; Л.: Энергия, 1964. 72 с.
8. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. М.: Физматлит, 1962. 236 с.
9. Суходолов, Ю. В. Спектрально-импульсные методы контроля обмоток асинхронных двигателей / Ю. В. Суходолов. Минск, 1993. 113 с.

Поступила 17.02.2017 Подписана в печать 20.04.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Sukhodolov Yu. V., Sheinikov A. A., Malashin A. N. (2010) Improvement of the Noise Immunity of Inter-Turn Insulation Control of the Collector Electric DC Machines with the Aid of Wave Damped Oscillations. *Sbornik Nauchnykh Statei Voennoi Akademii Respubliki Belarus'* [Collected Research Work of the Military Academy of the Republic of Belarus], (19), 67–72 (in Russian).
2. Sheinikov A. A., Sukhodolov Yu. V., Kaleda A. E. (2016) The Measurement of Small Changes in the Parameters of the Pulse Sequence. *Vestnik Voennoi Akademii Respubliki Belarus'* [Herald of the Military Academy of the Republic of Belarus], (1), 153–158 (in Russian).
3. Sheinikov A., Suchodolov Y. (2013) Improvement of a Method of the Pulse Windings Control of Aviation Direct Current Collector Generators. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 24–32 (in Russian).
4. Gutnikov V. S. (1990) *Filtering Measurement Signals*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 192 (in Russian).
5. Revin V. T. (2002) *Conversion and Converters of Measurement Information. Part 1*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 70 (in Russian).
6. Malashin A. N., Sukhodolov Yu. V., Chumakov S. A., Shakun S. I. (2015) *Spectral (Frequency) Method of Electrical Circuits Analysis*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus. 95 (in Russian).
7. Mirskii G. Ya. (1964) *Measurement of Time Intervals*. Moscow – Leningrad, Energiya Publ. 72 (in Russian).
8. Kharkevich A. A. (1962) *Spectra and Analysis*. Moscow, Fizmatlit. 236 (in Russian).
9. Sukhodolov Yu. V. (1993) *Spectral-and-Pulsed Methods of Control of Windings of Asynchronous Motors*. Minsk. 113 (in Russian).

Received: 17 February 2017 Accepted: 20 April 2017 Published online: 29 January 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-47-59

УДК 697.112.3:620.179.11

Определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Б. М. Хрусталеv¹⁾, В. Д. Сизов¹⁾

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

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

Реферат. Проведение мероприятий по увеличению термического сопротивления ограждающих конструкций требует определения их теплофизических характеристик, в основу методов определения которых положено решение задач теплопроводности, устанавливающее связь между пространственно-временными изменениями температуры под действием источника теплоты. В данной работе используется решение задачи при нестационарном нагреве ограждающей конструкции в виде неограниченной пластины при граничных условиях III рода. По известным соотношениям и графикам определяются изменения температуры поверхности от времени прогрева, термического сопротивления конструкции, аргументов F_0 и Bi , т. е. начальных и граничных условий. Полученные графические зависимости показывают, что температура поверхности зависит от термического сопротивления, а температура на противоположной поверхности за время теплового воздействия практически не изменяется за время $\tau = 5$ ч. Таким образом, если наружная температура воздуха изменилась, то по скорости изменения температуры поверхности или относительной температуры θ можно определить теплофизические характеристики, решая обратную задачу теплопроводности, используя преобразованное соотношение для определения R как функцию $R = f(\theta, \tau)$. Если использовать построенные графические зависимости $R = f(\theta, \tau)$ при различных коэффициентах теплоотдачи, то по измеренным температурам в различные промежутки времени можно определить термическое сопротивление в эти же промежутки времени и по их среднему значению – искомое сопротивление теплопередаче $\bar{R}$. Полученные нами расчетные аналитические соотношения и графические зависимости показывают адекватность проведенным натурным измерениям, если выбирать участки с однородным температурным полем и температурной историей, и их можно использовать при определении сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции в виде неограниченной пластины при граничных условиях III рода.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, сопротивление теплопередаче, нестационарный режим, аргументы F_0 и Bi , неограниченная пластина, граничные условия

Для цитирования: Хрусталеv, Б. М. Определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций / Б. М. Хрусталеv, В. Д. Сизов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 47–59. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-47-59

Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-96-56
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Khroustalev Boris M.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-96-56
tg_v_fes@bntu.by

Determining Heat Transmission Resistance of Enclosing Structures

B. M. Khroustalev¹⁾, V. D. Sizov¹⁾

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

Abstract. Fulfillment of the activities aimed to an increase of the thermal resistance of enclosing structures requires the determination of their thermophysical characteristics with the use of the determination method based on the solution of problems of heat conduction, establishing the connection between the spatial and temporal temperature changes under the effect of heat source. This work uses the solution of the problem under nonstationary heating of the enclosing structure in the form of unrestricted plate with boundary conditions of the III kind. According to the known relations and graphs alterations in surface temperature depending on warm-up time, on thermal resistance of constructions and on arguments of Fo and Bi , i. e. initial and boundary conditions are determined. The graphic dependencies that have been obtained show that the surface temperature depends on the thermal resistance, while the temperature at the opposite surface during heat exposure remains practically unchanged during $\tau = 5$ h. Thus, if the outside air temperature is altered, then the rate of change of surface temperature or relative temperature θ make it possible to determine the thermophysical characteristics by solving the inverse problem of thermal conductivity with the use of the converted ratio to determine R as a function $R = f(\theta, \tau)$. If the constructed graphic dependencies $R = f(\theta, \tau)$ are used at different heat transfer coefficients, then according to the measured temperatures at different time intervals it is possible to determine thermal resistance in the same time intervals and, according to their average value, determine the required resistance to heat transfer $\bar{R}$. The estimated ratio of analytical and graphic dependencies that we have obtained demonstrate the adequacy of the conducted full-scale measurements, if the areas with homogeneous temperature field and temperature history are chosen, and they can be used in determining the heat resistance of the enclosing structure in the form of unrestricted plate with boundary conditions of the III kind.

Keywords: enclosing structures, heat transmission resistance, non-stationary mode, arguments of Fo and Bi , unrestricted plate, boundary conditions

For citation: Khroustalev B. M., Sizov V. D. (2018) Determining Heat Transmission Resistance of Enclosing Structures. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 47–59. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-47-59 (in Russian)

Разработка мероприятий по утеплению наружных ограждающих конструкций при возведении и реконструкции зданий проблематична без качественной оценки их теплофизических характеристик, в первую очередь термических сопротивлений, сопротивлений теплопередаче. Особенно это касается ограждений, эксплуатируемых многие десятилетия, так как удельный тепловой поток не может изменяться синхронно с изменением температуры наружного и внутреннего воздуха [1–6].

Для определения фактических значений теплопередачи через ограждающие конструкции необходимо учитывать динамику изменения температур и тепловых потоков на поверхности ограждения.

До настоящего времени отсутствует корректная методика расчета, которая бы с большой достоверностью описывала процесс тепло- и массопереноса, поэтому основные задачи исследований – получение аналитических решений для ряда краевых задач и разработка на их базе метода

аналитико-экспериментального расчета, простого в физическом понимании, удобного в инженерном обращении и обладающего высокой точностью.

При анализе, решении задач переноса теплоты (массы) в различных материалах используют методы:

- линеаризации: алгебраических, интегральных подстановок, интегральных балансов (теплоты и массы), последовательных приближений, малых параметров (возмущений);

- вариационные (Био, Канторовича, Лейбензона, Ритца, Трефтца и др.) [7];

- проекционные: интегральных тепловых балансов;

- приведения краевых задач с нелинейными граничными условиями (ГУ) к эквивалентным и нелинейным интегральным уравнениям.

Известны условия, когда коэффициенты внутреннего, внешнего тепло- и массопереноса квазистационарны, что справедливо для линейных потоков теплоты и массы, для которых используют методы Фурье, функции Грина, Лапласа, Лапласа – Карсона и др.

Все методики имеют достоинства и недостатки, а следовательно, существуют определенные ареалы задач, которые эффективны при больших или малых числах Фурье и Био.

В основу методов определения теплофизических характеристик материалов положено решение задач теплопроводности, устанавливающее связь между пространственно-временными изменениями температуры тела под действием источника теплоты. Так как температурное поле зависит от его теплофизических характеристик, по известному изменению температуры в одной или нескольких точках исследуемого тела можно рассчитать его коэффициенты тепло- и теплопроводности, а значит, и термическое сопротивление.

Являясь характеристикой пространственного переноса теплоты, теплопроводность проявляется в условиях заметных градиентов температурного поля внутри вещества. Для непосредственного измерения локального градиента температур, чаще всего на основе значений температуры, в характерных точках образца восстанавливают его температурное поле и через него расчетным способом определяют градиенты температуры в тех сечениях образца, для которых экспериментально измерены или заданы удельные тепловые потоки.

В то же время при создании методов и устройств измерения теплопроводности главные затруднения связаны с тем, что необходимо выделить в исследуемом образце изотермическое сечение для установления температурного градиента и удельного теплового потока. С этой целью обычно проводятся измерения на образцах классической формы, например пластине, создавая в ней одномерные температурные поля.

Теоретический анализ краевых задач теплопроводности показывает, что комплексные определения теплофизических характеристик возможны при помощи методов, основанных на решении уравнения нестационарного поля температур. Они свободны от многих недостатков, присущих стационарным методам, однако имеют более высокую погрешность в определе-

нии искомых величин. Преимущество нестационарных методов в том, что из результатов одного непродолжительного опыта можно определить тепло- и температуропроводность исследуемого материала, а в квазистационарном режиме – их температурную зависимость.

На сегодня методы, определяющие теплофизические характеристики, базирующиеся на закономерностях нестационарного теплового потока, разделяются на следующие группы [8]: регулярного теплового режима; основанные на определении параметров нестационарного температурного поля в первой стадии его развития; квазистационарного теплового режима.

Все перечисленные методы в той или иной мере можно использовать для контроля термического сопротивления.

При определении теплофизических характеристик ограждающих конструкций наиболее близкими с физической точки зрения являются процессы нагрева или охлаждения исследуемого тела как неограниченной пластины при граничных условиях III рода – температурный потенциал при одномерном потоке теплоты не достигает противоположной границы за время теплового воздействия.

Например, рассмотрим решение данной задачи при определенных начальных условиях, при котором можно представить графические зависимости изменения температуры поверхности охлаждаемого (нагреваемого) тела в различные отрезки времени в зависимости от начальных теплофизических характеристик.

При этом флуктуации температур при одностороннем подводе теплоты на противоположной плоскости не наблюдаются.

В то же время, используя данные [9], можно сделать вывод, что наиболее близким к описываемому процессу является решение задачи, в отличие от ранее предлагаемого [10], суть которого состоит в следующем.

Начальная температура неограниченной пластины по толщине одинакова. У одной поверхности температура среды известна (задана), на другой поверхности температура равна начальной.

Начальные граничные условия следующие:

$$t|_{\tau=0} = t_{0i}; \quad -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = x(\delta - t_{x=0}); \quad \delta = \text{const}; \quad t|_{x=h} = t_0.$$

Тогда безразмерная относительная и средняя температуры могут быть рассчитаны из следующих уравнений:

– параметр температуры

$$\theta = \frac{t - t_0}{\vartheta - t_0} = \frac{\text{Bi} \cdot (1 - \eta)}{\text{Bi} + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin[v_n (1 - \eta) \exp(-v_n^2 \text{Fo})], \quad (1)$$

где A_n – параметр амплитуды колебаний температуры,

$$A_n = \frac{2\text{Bi}}{\sin v_n (v_n^2 + \text{Bi}^2 + \text{Bi})}; \quad (2)$$

– параметр средней температуры

$$\frac{\bar{t} - t_0}{\vartheta - t_0} = \frac{\text{Bi}}{2(\text{Bi} + 1)} - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\nu_n^2 \text{Fo}), \quad (3)$$

где B_n – относительная величина,

$$\text{Bi}_n = \frac{A_n}{\nu_n} (1 - \cos \nu_n); \quad (4)$$

n – число членов ряда;

– аргументы:

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{h^2}; \quad \text{Bi}_i = \frac{\bar{\alpha}_{\text{эк}} h}{\lambda}; \quad \eta = \frac{x}{h},$$

где $\bar{\alpha}_{\text{эк}}$ – коэффициент теплоотдачи у внешней поверхности, Вт/(м²·К);

h – толщина слоев ограждающей конструкции, м; $a = \frac{\lambda_{\text{эк}}}{c_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}}}$ – коэффи-

циент температуропроводности, м²/ч; $c_{\text{эк}}$ – массовая изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К); $\lambda_{\text{эк}}$ – коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К); $\rho_{\text{эк}}$ – средняя плотность конструкции, кг/м³; η – параметр толщины.

На основании указанных выше формул [9] построены графические зависимости, из которых можно определить искомые значения температур по следующим выражениям:

– температура поверхности в осевой плоскости пластины (ограждения) при $\eta = 0$ и $\eta = 0,5$

$$t_n = t_0 + \bar{\theta}(t_n - t_0); \quad (5)$$

– средняя температура

$$\bar{t} = t_0 + \theta(t_n - t_0);$$

– градиент температуры при $\eta = 1,0$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = -G \frac{\vartheta - t_0}{h},$$

где $G = \frac{\text{Bi}}{1 + \text{Bi}}$.

Рассмотрим пример при следующих начальных условиях:

– для табл. 1:

$h = 0,25$ м; $\rho = 1100$ кг/м³; $c = 840$ Дж/(кг·К);

$\alpha = 10,0$ Вт/(м²·К); $R = 1,0$ м²·К/Вт; $\lambda = 0,25$ Вт/(м·К);

$a = 0,00097$ м²/ч; $t_0 = 0$ °С; $t_{\text{к}} = -5,0$ °С;

– для табл. 2:

$$R = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}; \quad \lambda = 0,125 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad a = 0,00048 \text{ м}^2/\text{ч};$$

$$\text{Bi} = 20,0; \quad t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_k = -5,0 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\alpha = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Рассчитанные данные сводим в табл. 1 и 2, по которым можно построить графические зависимости $t = f(\tau, R, \eta)$ (рис. 1).

Таблица 1

$\tau, \text{ч}$	Fo	Bi	$\theta_{\eta=0}$	$t_{\eta=0}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{\eta=0,5}$	$t_{\eta=0,5}, \text{ }^\circ\text{C}$	$G_{\eta=1,0}$	$\frac{\partial t}{\partial x_{\eta=1,0}}, \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$
1	0,015	10	0,65	-3,25	0,01	0,05	0	0
2	0,030	10	0,74	-3,70	0,03	-0,15	0	0
5	0,070	10	0,82	-4,10	0,1	-0,85	0,80	1,6
10	0,155	10	0,86	-4,30	0,29	-1,45	0,38	7,6

Таблица 2

$\tau, \text{ч}$	Fo	Bi	$\theta_{\eta=0}$	$t_{\eta=0}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{\eta=0,5}$	$t_{\eta=0,5}, \text{ }^\circ\text{C}$	$G_{\eta=1,0}$	$\frac{\partial t}{\partial x_{\eta=1,0}}, \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$
1	0,03	20	0,80	-4,00	0,05	-0,25	0	0
2	0,06	20	0,85	-4,25	0,12	-0,60	0,40	0,8
5	0,15	20	0,90	-4,50	0,31	-1,55	0,40	8,0
10	0,30	20	0,92	-4,60	0,42	-2,10	0,80	16,0

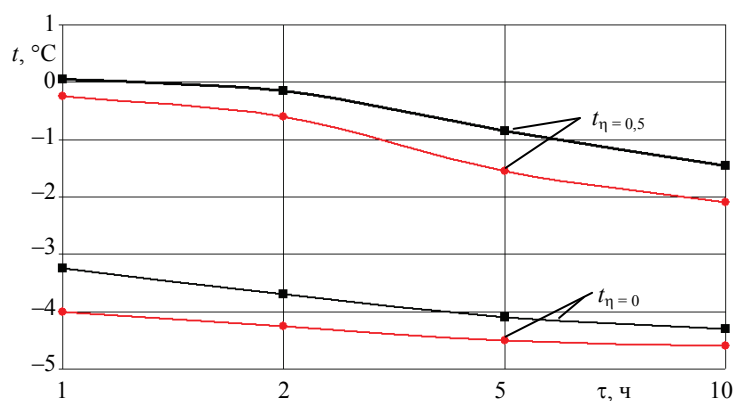


Рис. 1. Зависимости $t = f(\tau, R, \eta)$: —■— — при $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;
—●— — при $R = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$

Fig. 1. Dependencies $t = f(\tau, R, \eta)$: —■— — when $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$;
—●— — when $R = 2.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{W}$

Из рис. 1 следует, что изменения температур поверхности $t_{\eta=0}$ и в осевой плоскости $t_{\eta=0,5}$ неограниченной пластины зависят от термического сопротивления материала ограждающей конструкции R и времени теплового воздействия τ .

Вместе с тем при продолжительности воздействия τ до 2 ч градиент температуры $\partial t/\partial x$ на противоположной поверхности практически равен 0 при $R = 1,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ и при $R = 2,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ изменяется незначительно, а только при $\tau > 5$ ч изменения температур существенны, т. е. в этом случае при $\tau < 3$ ч справедливы ГУ III рода.

Для более тщательного анализа изменений температур наружной поверхности в осевой плоскости пластины и на противоположной поверхности для решения уравнения (1) составлена программа, позволяющая решить данную задачу при различных начальных условиях.

В качестве примера можно привести таблицы полученных результатов:
– начальные условия для табл. 3:

$R = 2,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$; $h = 0,25 \text{ м}$; $\rho = 1100 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c = 0,840 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 $\alpha = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $\lambda = 0,125 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $a = 0,00049 \text{ м}^2/\text{ч}$;
 $Bi = 20,0$; $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{кон}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$;

– начальные условия для табл. 4:

$R = 1,0 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$; $h = 0,25 \text{ м}$; $\rho = 1100 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c = 0,840 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 $\alpha = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $\lambda = 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $a = 0,00097 \text{ м}^2/\text{ч}$;
 $Bi = 10,0$; $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{кон}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 3

$\tau, \text{ ч}$	Fo	$\theta_{\eta=0}$	$t_{\eta=0}$	$\theta_{\eta=0,5}$	$t_{\eta=0,5}$	$\theta_{\eta=1,0}$	$t_{\eta=1,0}$
0,2	0,0016	0,5749	-5,75	0,1629	-1,63	0	0
0,5	0,0039	0,6468	-6,47	0,1668	-1,67	0	0
0,8	0,0062	0,6949	-6,95	0,1667	-1,67	0	0
1,0	0,0780	0,7187	-7,19	0,1654	-1,65	0	0

Таблица 4

$\tau, \text{ ч}$	Fo	$\theta_{\eta=0}$	$t_{\eta=0}$	$\theta_{\eta=0,5}$	$t_{\eta=0,5}$	$\theta_{\eta=1,0}$	$t_{\eta=1,0}$
0,2	0,00312	0,4318	-4,32	-0,0049	0,049	0	0
0,5	0,00779	0,5398	-5,40	-0,0009	0,009	0	0
0,8	0,01247	0,6025	-6,02	0,0003	-0,003	0	0
1,0	0,01558	0,6319	-6,32	0,0015	-0,015	0	0

На основании полученных расчетных данных построены зависимости температур при $\eta = 0$; 0,5 и 1,0 в разные промежутки времени и при различных величинах термических сопротивлений, которые представлены на рис. 2.

Графики рис. 2 показывают, что изменения температуры поверхности и в осевой плоскости бесконечной пластины зависят от заданных термических сопротивлений и времени воздействия отрицательных наружных температур, и в тот же интервал воздействия ($\tau_{\text{max}} = 1,0 \text{ ч}$) градиент температуры не достигает противоположной границы пластины (внутренней поверхности наружного ограждения) при заданных начальных условиях.

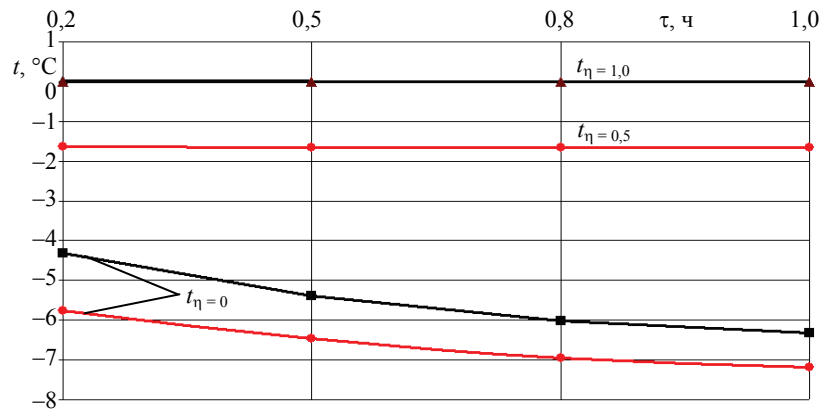


Рис. 2. Зависимости $t = f(\tau, R, \eta)$: —■— — при $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; —●— — при $R = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; —▲— — рассчитанные значения температур $t_{\eta=0,5}$ при $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ малы и графики $t_{\eta=0,5}$ при $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ и $t_{\eta=1,0}$ при $R = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ и $R = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ фактически совпадают с осью координат

Fig. 2. Dependencies $t = f(\tau, R, \eta)$: —■— — when $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; —●— — when $R = 2.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; —▲— — calculated values of temperatures $t_{\eta=0,5}$ when $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ are small and graphics $t_{\eta=0,5}$ when $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ and $t_{\eta=1,0}$ when $R = 1.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ and $R = 2.0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ actually coincide with the axis of the coordinate

При этом продолжительность нестационарного режима сохраняется до времени

$$\tau = \frac{\delta^2}{a} = \frac{0,25^2}{0,00097} = 64 \text{ ч.}$$

Из аналитических расчетов и графиков можно сделать вывод, что если наружная температура воздуха изменилась, то по скорости изменения температуры поверхности или θ можно определить теплофизические характеристики, решая обратную задачу теплопроводности или имея набор расчетных зависимостей (графиков), по которым можно построить соответствующую номограмму.

Приведенные выше исследования показывают, что на их основании можно разработать методику и способ определения термического сопротивления при нестационарном режиме охлаждения (нагрева) конструкций для ГУ III рода.

Способ определения теплопередачи ограждающих конструкций при тепловизионных методах измерения температур поверхности основан на предположении, что ограждающая конструкция рассматривается как неограниченная пластина.

В случае нагревания (охлаждения) конструкции в виде неограниченной пластины при ГУ III рода для определения относительной избыточной температуры можно воспользоваться выражением (1).

Из (1) видно, что относительная температура — функция теплофизических характеристик ограждения, коэффициента теплоотдачи у наружной поверхности и продолжительности измерений, которые входят в критерии Fo и Bi .

Для определения термического сопротивления теплопередаче $R_{\text{эк}}$ воспользуемся соотношениями:

$$\lambda_{\text{эк}} = \frac{\sum \delta_i}{R_{\text{эк}}}; \quad a = \sum \frac{\lambda_{\text{эк}}}{c_{\text{эк}} \rho}; \quad R_{\text{эк}} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{эк}}};$$

$$\text{Bi} = \alpha \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{эк}}} = \bar{\alpha} R_{\text{эк}}; \quad \text{Fo} = \frac{a \tau}{\delta_i^2} = \frac{\tau}{c_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}} \delta_i R_{\text{эк}}}.$$

Подставляя приведенные соотношения в (1), получим уравнение, из которого определим сопротивление теплопередаче ограждения:

$$\theta = \frac{t_{(0, \tau_i)} - t_{(0, \tau_0)}}{t_{(\infty, \tau_i)} - t_{(0, \tau_0)}} = \frac{\bar{\alpha} R (1 - \eta)}{\alpha R + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin[v_0 (1 - \eta)] \times$$

$$\times \exp\left(-v^2 \frac{\tau_i}{\delta_i c_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}} R_{\text{эк}}}\right), \quad (6)$$

где $\bar{\alpha}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{\text{к}} + \bar{\alpha}_{\text{л}}$; $\bar{\alpha}_{\text{к}}$, $\bar{\alpha}_{\text{л}}$ – расчетные конвективный и радиационный коэффициенты теплоотдачи.

Из (6) следует, что, определив относительную температуру θ в любой момент времени, пока тепловой потенциал не достиг противоположной поверхности пластины, по результатам натурных измерений можно найти и термическое сопротивление конструкции.

Для определения сопротивления теплопередаче $R_{\text{эк}} = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{\text{эк}}}$ или эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эк}}$ вначале задаются ориентировочные расчетные теплофизические характеристики, ориентировочные величины коэффициентов теплоотдачи у наружной поверхности $\bar{\alpha}_{\text{эк}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$ в пределах нормируемых. По этим значениям определяются критерии Bi и Fo при различных $\lambda_{\text{эк}}$, $c_{\text{эк}}$, $\rho_{\text{эк}}$ в заданные кратные промежутки времени между τ_0 и τ_{max} , за которые температурный потенциал не изменит температуру внутренней поверхности ограждения, т. е. $t_{(x=\delta, \tau_{\text{max}})} \geq t_{(0, \tau_0)}$.

По полученным расчетным величинам Bi и Fo , по соотношению (6) или построенным номограммам [9] вычисляются зависимости $\theta = f(\text{Fo}, \text{Bi})$, по которым можно опосредованно определить зависимость $R = f(\theta, \tau)$ в графическом виде при различных $\bar{\alpha}_{\text{эк}}$.

Затем для определения фактической величины $R_{\text{эк}}$ ограждающей конструкции замеряют в расчетные промежутки времени начальную температуру ограждающей конструкции, текущую температуру ограждающей конструкции в заданный промежуток времени и изменившуюся температуру окружающей среды и, в конечном итоге, рассчитывают θ_j .

По разности температур $t_{(0, \tau_j)}$ и $t_{(\infty, \tau_j)}$ находят конкретную величину $\bar{\alpha}$ по известным соотношениям.

Величину $R_{\text{эк}}$ в зависимости от полученных $\bar{\alpha}$ и τ_j можно определить по графику $R = f(\theta, \tau)$ в разные промежутки времени, найдя ее среднее значение $R_{\text{ср}} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n}$ или используя преобразованное относительно R соотношение (6).

Все изложенное можно показать на примере.

По выражению (6) построен график зависимости $\theta = f(\text{Fo}, \text{Bi})$, по которому можно опосредованно определить зависимость $R = f(\theta, \tau)$, подставив различные значения θ в определенные промежутки времени.

Например, для $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при начальных условиях:

$t_0, ^\circ\text{C}$	$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$h, \text{м}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$R, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$			$\tau, \text{ч}$		
0	-5	5	0,25	0,84	1000	0,6	1,0	1,4	1	2	5

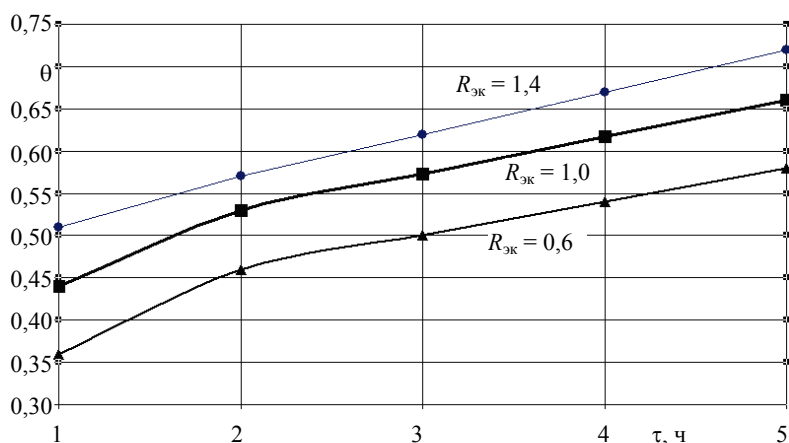
Расчет представлен в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчета θ при $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
The results of the calculation θ when $\alpha = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$R, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	0,6			1,0			1,4		
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,42			0,25			0,18		
$a, \text{м}^2/\text{ч}$	0,0016			0,0010			0,0007		
$\tau, \text{ч}$	1	2	5	1	2	5	1	2	5
Fo	0,026	0,052	0,130	0,016	0,031	0,078	0,011	0,022	0,056
Bi	3,0			5,0			7,0		
θ	0,36	0,46	0,58	0,44	0,53	0,66	0,51	0,57	0,72

По результатам табл. 5 построены зависимости $R = f(\theta, \tau)$ при $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (рис. 3).

Рис. 3. Зависимости $R = f(\theta, \tau)$ при $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ Fig. 3. The dependencies $R = f(\theta, \tau)$ when $\alpha = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Рассмотрим случай при $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $h = 0,25 \text{ м}$ для начальных условий:

$t_0, ^\circ\text{C}$	$\vartheta, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$h, \text{м}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$R, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$			$\tau, \text{ч}$		
0	-5	10	0,25	0,84	1000	0,6	1,0	1,4	1	2	5

Расчеты представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета θ при $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
The results of the calculation θ when $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$R, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	0,6			1,0			1,4		
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,42			0,25			0,18		
$a, \text{м}^2/\text{ч}$	0,0016			0,0010			0,0007		
$\tau, \text{ч}$	1	2	5	1	2	5	1	2	5
Fo	0,026	0,052	0,130	0,016	0,031	0,078	0,011	0,022	0,056
Bi	6,0			10,0			14,0		
θ	0,55	0,66	0,77	0,64	0,72	0,82	0,69	0,76	0,84

По результатам табл. 6 построены зависимости $R = f(\theta, \tau)$ при $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (рис. 4).

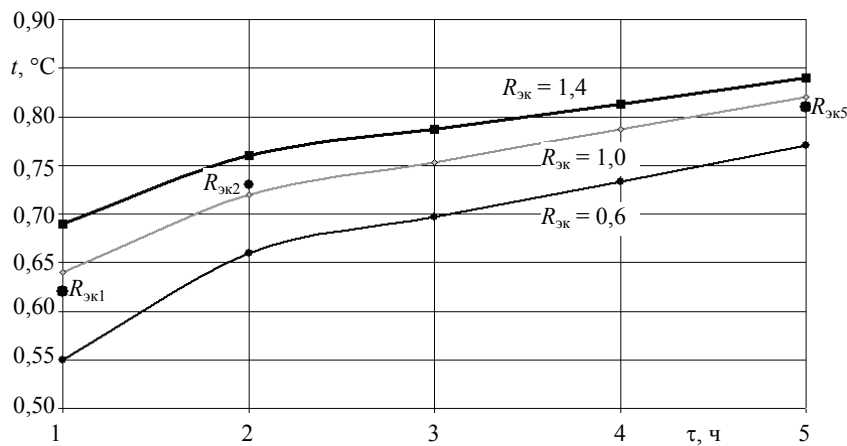


Рис. 4. Зависимости $R = f(\theta, \tau)$ при $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Fig. 4. The dependencies $R = f(\theta, \tau)$ when $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Определение сопротивления теплопередаче по графическим зависимостям, построенным на основании расчетных величин (рис. 3 и 4) с использованием (1) и (6), по которым в [9] построены номограммы для определения опосредованно $R = f(\theta, \tau)$, производится следующим образом.

В процессе исследований были определены температуры в разные промежутки времени (табл. 7).

Таблица 7

Время τ , ч	$t_{(0,\tau_0)}$, °C	$t_{(\infty,\tau_j)}$, °C	$t_{(0,\tau_j)}$, °C	$t_{(x=\delta,\tau_j)}$, °C	θ	$R_{эк,j}$, м ² ·K/Вт
1	-5,0	-10,0	-8,10	-5,0	0,62	0,90
2	-5,0	-10,0	-8,56	-5,0	0,73	1,11
5	-5,0	-10,0	-9,05	-5,1	0,81	0,93

По рис. 4 получены значения $R_{эк1} = 0,90$; $R_{эк2} = 1,11$; $R_{эк5} = 0,93$.

$$\text{Средняя из измеренных величин } R_{эк.ср} = \frac{0,90 + 1,11 + 0,93}{3} = 0,98 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$$

определяет искомое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции. При этом время окончания измерений составило 5 ч, когда $t_{(x=\delta,\tau_{\max})} \geq t_{(0,\tau_0)}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что расчетные соотношения адекватны проведенным натурным измерениям, а построенными по ним графиками можно пользоваться для контроля сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, если выбрать наиболее усредненную по характеристикам зону измерений, т. е. участков с однородным температурным полем, и период времени температурной истории, где задача может решаться с заданной точностью при сокращении количества измерений.

Из вышеуказанного следует, что на основании проведенных аналитических и теоретических исследований можно предложить новые методику и способ определения теплофизических характеристик, в том числе и R .

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований разработаны методика и способ определения теплофизических характеристик, в основу которых положено решение нестационарной задачи теплопроводности, устанавливающее связь между временным и пространственными изменениями температуры под воздействием источника (стока) теплоты.

2. Разработанные методика и способ позволяют определить сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции при нестационарном режиме в натурных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко, Н. Н. Влияние массивности на максимальный тепловой поток / Н. Н. Руденко, И. Н. Волошановская // Строительство-2001: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2001. С. 84–87.
2. Об утверждении требований к энергетическому паспорту, составленному по результатам обязательного энергетического обследования, и энергетическому паспорту, составленному на основании проектной документации и правил направления копий энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования: Министерство энергетики Российской Федерации, приказ от 19.04.2010 № 182.
3. Фурсова, И. Н. Алгоритм исследования плотности теплового потока через ограждение при нестационарных тепловых условиях / И. Н. Фурсова, А. А. Капралов // Строительство-2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д: РГСУ, 2013. С. 87–88.

4. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv [и др.]. Минск: Беларус. нац. техн. ун-т, 2007. Ч. 1. 606 с.
5. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин, под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. 5-е изд., испр. и пересмотр. М.: АВОК-Пресс, 2006. 256 с.
6. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
7. Био, М. А. Вариационные принципы в теории теплообмена / М. А. Био. М.: Энергия, 1975. 209 с.
8. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков [и др.]; под ред. А. В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. 336 с.
9. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. Л.: Энергия, 1968. 304 с.
10. К вопросу диагностики сопротивлений теплопроводности наружных ограждающих конструкций зданий / Б. М. Хрусталеv [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 4. С. 36–43.

Поступила 27.06.2017 Подписана в печать 25.08.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Rudenko N. N., Voloshanovskaya I. N. (2001) The Effects of Massiveness on the Maximum Heat Flux. *Stroitel'stvo-2001: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Construction-2001: Materials of the International Scientific-and-Practical Conference]. Rostov-on-Don, Rostov State University of Civil Engineering, 84–87 (in Russian).
2. On Approval of Requirements for Energy Passport, Based on the Results of Mandatory Energy Audit and Energy Passport, Compiled on the Basis of Project Documentation and Rules for Sending Copies of the Energy Passports Compiled in Accordance with the Results of Mandatory Energy Audit. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation, 19.04.2010, No 182. *Electronic Fund of Legal Normative and Technical Documentation*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902220954> (Accessed: 4 September 2017) (in Russian).
3. Fursova I. N., Kapralov A. A. (2013) The Algorithm to Examine the Density of the Heat Flux through the Fence under Non-Stationary Thermal Conditions. *Stroitel'stvo-2013: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Construction-2013: Materials of the International Scientific-and-Practical Conference]. Rostov-on-Don, Rostov State University of Civil Engineering, 87–88 (in Russian).
4. Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Akel'ev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerezko A. V. (2007) *Heat and Mass Exchange. Part 1*. Minsk: Belarusian National Technical University. 606 (in Russian).
5. Fokin K. F., Tabunshchikov Yu. A., Gagarin V. G. (eds.) (2006) *Construction Heat Engineering of Enclosing Parts of Buildings*. 5th ed. Moscow, AVOK-Press. 256 (in Russian).
6. Lykov A. V. (1967) *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 600 (in Russian).
7. Bio M. A. (1975) *Variational Principles in the Theory of Heat Transfer*. Moscow. Energiya Publ. 209 (in Russian).
8. Shashkov A. G., Volokhov G. M., Abramenko T. N., Kozlov V. P., Lykov A. V. (ed.) (1973) *Methods of Determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity*. Moscow. Energiya Publ. 336 (in Russian).
9. Pekhovich A. I., Zhidkikh V. M. (1968) *Calculations of the Thermal Regime of Solids*. Leningrad, Energiya Publ. 304 (in Russian).
10. Khroustalev B. M., Akeliev V. D., Sizov V. D., Zolotoreva I. M. (2010) Towards Diagnostics of Heat Conductivity Resistance of Building Exterior/Outside Fencing Constructions. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 36–43 (in Russian).

Received: 27 June 2017

Accepted: 25 August 2017

Published online: 29 January 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-60-69

UDC 504.06:51-74

Ecological and Economic Efficiency of Traditional and Alternative Methods of Electrical Energy Production with the Features of the Islamic Republic of Iran

M. A. Mehdizadeh¹⁾, A. S. Kalinichenko¹⁾, S. A. Laptyonok¹⁾

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

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

Abstract. The problems of energy, environment protection and ecology play a major role in the development of economy strategy in any country. Most of the traditional power stations operating on organic fuels have a negative impact on the environment. Furthermore, there is a depletion of natural resources due to human activities. One of the ways to solve the problem of environmentally friendly energy production is to use alternative sources of energy. Based on the foregoing, the development of the strategy for the development of traditional and alternative energy must consider environmental and economic factors in a specific country. In the present work it was evaluated the environmental and economic efficiency of application of traditional and alternative energy with regard to the conditions of the Islamic Republic of Iran. The program packages RETScreen which is one of the most effective tools to accomplish the task was used. Calculations of cumulative cash flow from the operation of power plants using different types of primary energy are carried out using models of package RETScreen for assessing the input efficiency of various types of energy sources aiming to cover the intending growth in electricity demands and the environmental assessment with reference to different countries. The results of the study showed that the planning prospects of the development of energy systems in relation to the Islamic Republic of Iran to cover the expected growth in electricity demands it is advisable to use the alternative energy sources, and, first of all, the generating capacity based on solar and wind energy.

Keywords: traditional and alternative energetic, RETScreen, ecological and economic effectiveness

For citation: Mehdizadeh M. A., Kalinichenko A. S., Laptyonok S. A. (2018) Ecological and Economic Efficiency of Traditional and Alternative Methods of Electrical Energy Production with the Features of the Islamic Republic of Iran. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 60–69. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-60-69

Адрес для переписки

Калиниченко Александр Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 296-66-86
akalinichenko@bntu.by

Address for correspondence

Kalinichenko Alexander S.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 296-66-86
akalinichenko@bntu.by

Эколого-экономическая эффективность традиционных и альтернативных способов получения электрической энергии с учетом особенностей Исламской Республики Иран

М. А. Мехдизадех¹⁾, А. С. Калиниченко¹⁾, С. А. Лаптёнок¹⁾

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

Реферат. Проблемы энергетики, окружающей среды, экологии играют большую роль при разработке стратегии развития экономики любой страны. Большинство традиционных энергетических установок, работающих на органическом топливе, оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду. Кроме того, происходит истощение природных ресурсов вследствие человеческой деятельности. Поэтому все больше внимания уделяется учету влияния создаваемых объектов на экологическую обстановку. Один из путей решения проблемы производства экологически безопасной энергии – использование альтернативных источников энергии. Исходя из вышесказанного, при разработке стратегии развития традиционной и альтернативной энергетики необходимо учитывать экологические и экономические факторы применительно к особенностям конкретной страны. В настоящей работе выполнена оценка экологической и экономической эффективности использования традиционной и альтернативной энергетики применительно к условиям Исламской Республики Иран. При этом использовались пакеты программы RETScreen, которая является одним из наиболее эффективных инструментов для реализации поставленной задачи. На основе моделей пакета RETScreen для оценки эффективности ввода различных типов энергоисточников с целью покрытия предполагаемых темпов роста потребности в электроэнергии, а также экологической оценки были проведены расчеты совокупного потока денежных средств от эксплуатации энергоустановок, использующих различные виды первичной энергии, применительно для ряда стран Европы, Азиатского региона и стран бывшего СССР. Результаты исследований показали, что при планировании перспектив развития энергосистем применительно к Исламской Республике Иран с целью покрытия предполагаемых темпов роста потребности в электроэнергии целесообразным представляется преимущественный ввод альтернативных энергоисточников и в первую очередь генерирующих мощностей, использующих солнечную энергию и энергию ветра.

Ключевые слова: традиционная и альтернативная энергетика, RETScreen, экологическая и экономическая эффективность

Для цитирования: Мехдизадех, М. А. Эколого-экономическая эффективность традиционных и альтернативных способов получения электрической энергии с учетом особенностей Исламской Республики Иран / М. А. Мехдизадех, А. С. Калиниченко, С. А. Лаптёнок // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 60–69. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-60-69

The energy problem, environmental protection and ecological problems have gradually become the focus of attention. Nowadays is characterized by the growth of energy consumption, which requires the increase of installations generating electricity. At the same time, most traditional power plants running on organic fuels have a negative impact on the environment [1]. Furthermore, there is a depletion of natural resources due to human activities. So, more attention is paid to consideration of the influence of newly created objects on the environment [2]. One of the ways to solve the production of environmentally

friendly energy is to use alternative sources of energy. Different countries seek for different solutions in the field of energy development in relation to their features. Based on the above, it is necessary to consider environmental and economic factors in relation to the specific country during the planning of a strategy for the development of traditional and alternative energy.

In the present work the environmental and economic efficiency of application of traditional and alternative energy with regard to the specific conditions of the Islamic Republic of Iran was evaluated. The program packages RETScreen which is one of the most effective tools to accomplish the task was used [3–5]. Calculations of cumulative cash flow from the operation of power plants using different types of primary energy are carried out using models of package RETScreen for assessing the input efficiency of various types of energy sources aiming to cover the intending growth in electricity demands and the environmental assessment with reference to several countries in Europe (Spain, Italy, France, Sweden), Asia (Armenia, Iraq, Iran, Turkey) and countries of the former USSR (Belarus, Lithuania, Russia, Ukraine).

Dependences of the values of the total cash flow from the operation of the power plants on the number of years of their operation as results of calculations were obtained.

All countries mentioned above can be divided into two groups according to the type of the total cash flow dynamics. The first group includes countries, where the cumulative cash flow from the operation of the generating facilities using various types of primary energy starts to grow since the introduction of the plant into operation according to a linear law (fig. 1). The second group consists of the countries, where the cumulative cash flow is characterized by a non-linear increase and can even delayed in time (fig. 2).

From the countries reviewed the first group includes France, Italy, Lithuania, Spain, Sweden and Ukraine, and the second one – Armenia, Belarus, Iraq, Iran, Russia and Turkey.

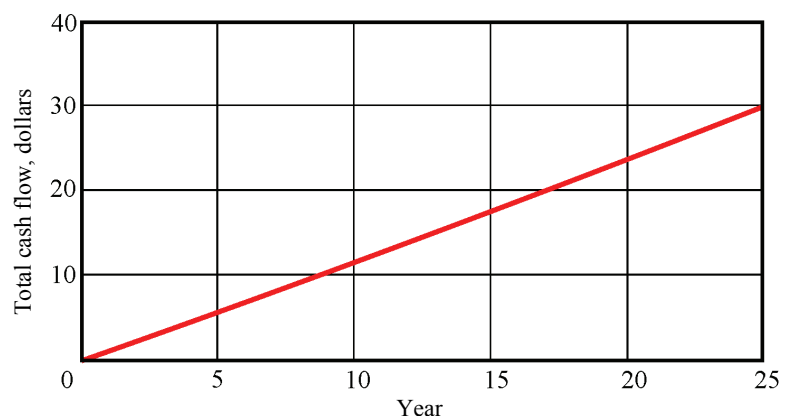


Fig. 1. The results of the calculation of the total cash-flow from power plants that use solar energy with regards to Sweden (RETScreen)

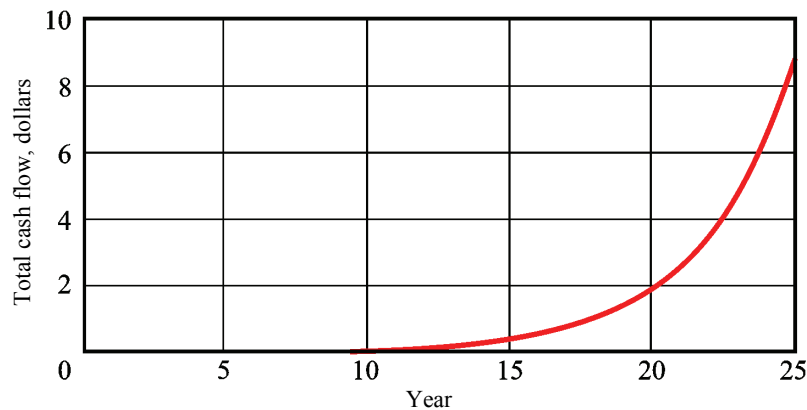


Fig. 2. The results of the calculation of the total cash-flow from power plants that use the energy of river runoff, for the Islamic Republic of Iran

To assess the economic efficiency of power-generating facilities, using various types of primary energy, different approaches based on the type of dynamics of formation of total income were used [6].

For the group of countries where the dynamics is linear, the total cash flow as the indicator of effectiveness was used. So, the increase in the total cash flow starting from the first year of operation can be described by the equation $y = ax$, where x is the sequence number of the operation year, a is a coefficient that defines the growth of aggregate cash flow during the year, which is a measure of efficiency and depends on the characteristics of a particular economy.

Sweden is characterized by a high level of economic development. As a result the profit from the input of the system can be obtained due to the significant volume of equity investment, lower rates on loans, long term lending, long-term investments and other economic factors associated with low levels of investment risks.

For a group of countries where the dynamics of income from the operation of the generating capacity has non-linear dependence the other approach are used. To define a function that describes this process the approximation of the data using the software complex Origin was carried out. For these countries the dynamics of the increase in total cash flow can be described as an exponential rate and almost perfectly described by the expression

$$y = ae^{\frac{x}{b}},$$

where x – number of years since the beginning of the project; a – coefficient, which is the base constant annual growth of aggregate cash flow and the coefficient b is a measure of the intensity of the increase of this flow.

The efficiency of the generating capacity in this case is directly dependent on the coefficient a and has the inverse relationship on the coefficient b .

A long payback period of projects in the Islamic Republic of Iran is due to the specific characteristics of schemes of financing construction and mainte-

nance of objects. First of all, there is the lack of own funds for investments in the projects implementation, high interest rates on loans, limitations on the ability for long-term loans and investment and other economic factors associated with high levels of investment risks. These factors are, primarily, the result of the U.S. and the European Union economic sanctions against the Islamic Republic of Iran (in particular, the embargo on oil supplies), which ran for 10 years and significantly reduced the level of economic development of the country.

Tab. 1 shows the values of annual income for generating capacity using different types of primary energy in the countries of the first group.

Table 1

The value of the annual income for generating capacity using different types of primary energy in the European Union countries and Ukraine (USA dollars)

Country	Wind	Gas	Solar	Hydro
Spain	2857143	69565217	1176471	88235294
Italy	3043478	75000000	1250000	93750000
France	2941177	75000000	1250000	93750000
Sweden	2857143	70000000	1162791	88235294
Lithuania	2926829	71428571	1219512	90909090
Ukraine	2890173	72463768	1250000	96000000
Mean value	2919324	72242926	1218129	91813280

The ratios of the primary economic effectiveness for generation capacity using different types of primary energy are presented in fig. 3. Clearly, the efficiency of hydropower and energy produced with natural gas is by orders of magnitude superior to the corresponding data for wind and solar energy (fig. 3).

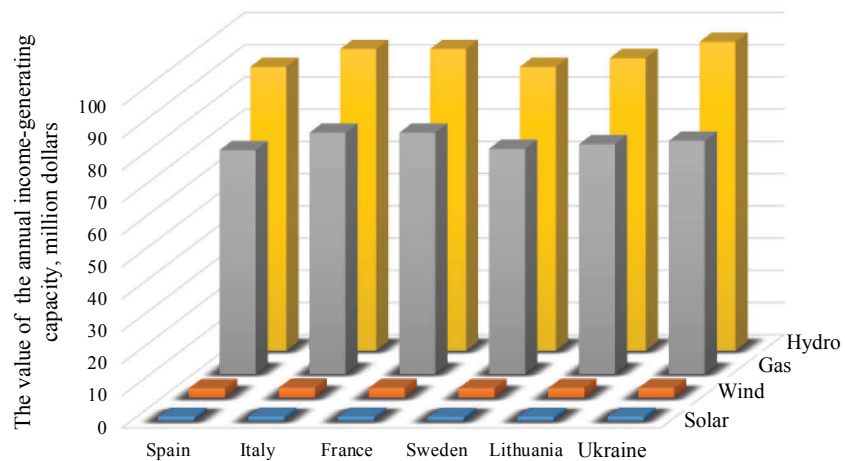


Fig. 3. The value of the annual income-generating capacity using different types of primary energy in the European Union countries and Ukraine (USA dollars)

For these countries with the nonlinear dynamics of operating income the annual income median is used as the performance indicator. Tab. 2 shows the va-

lues of annual income median for generation capacities that use different types of primary energy in countries of the second group.

Table 2

The annual income median for generation capacities that use different types of primary energy for countries of the second group (USA dollars)

Country	Wind	Gas	Solar	Hydro
Armenia	48070777	1584603752	27597597	2176739423
Iraq	49975034	1231159105	18513120	1492680219
Iran	59619502	1124817049	36072073	1762476522
Turkey	59267197	1459675015	32797896	1157424096
Belarus	11854195	2762525284	49461460	3750905577
Russia	96499620	2403639989	39751328	2895070364
Mean value	54214388	1761070032	34032246	2205882700

The ratios of the primary economic effectiveness for generation capacity using different types of primary energy are presented in fig. 4 and similar to countries of the first group (fig. 3). As well we see the superiority of gas and hydropower.

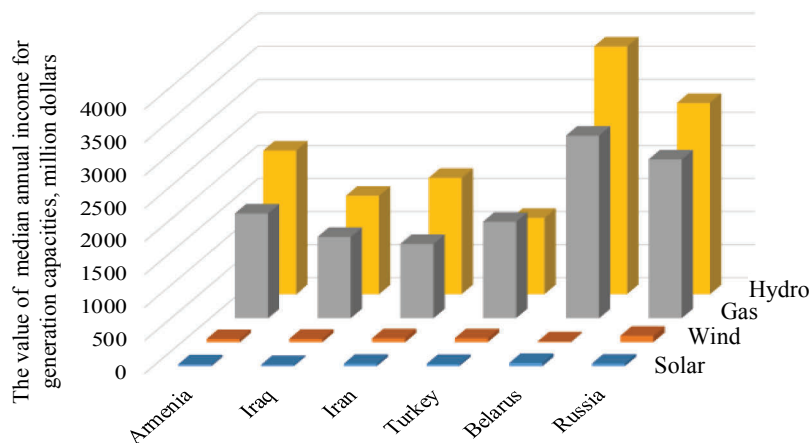


Fig. 4. The values of median annual income for generation capacities that use different types of primary energy for countries of the second group

With respect to Iran it can be noted that the energy complex allows annually producing 33000 MW of electricity. Moreover, 75 % of this amount gives natural gas, 18 % oil, 7 % hydroelectric power plants [7–9]. At the same time, there are prerequisites for efficient use of alternative energy sources [10]. Since Iran is devoted to the second group of countries, it is important to evaluate the efficiency of the alternative sources taking into account peculiarities of the country [11].

Despite the overall prevalence the total income can not fully characterize the ratio of the economic efficiency of power-generating facilities using various types of primary energy. In this case it is necessary to consider the costs that accompany a particular method of generating electrical energy and primarily construction costs and environmental damage.

Based on mentioned above the method described for evaluating the economic efficiency of generating capacity using different types of primary energy was

in a certain way modified. The modification consisted in accounting of specific costs of construction and indirect environmental costs associated with emission into the atmosphere of carbon dioxide for different types of generating capacities in terms of 1 MW [12, 13]. This approach allowed us to obtain the results displayed in tab. 3, 4 and fig. 5, 6.

Table 3

Specific values of annual income taking into account the construction cost and indirect environmental costs associated with emission into the atmosphere of carbon dioxide for generating capacity in the European Union countries and Ukraine (USA dollars)

Country	Wind	Gas	Solar	Hydro
Spain	2882.802	1783.063	2205.507	9166.219
Italy	2884.504	1796.074	2206.508	9197.299
France	2883.570	1796.074	2206.508	9197.299
Sweden	2882.502	1784.104	2205.321	9166.219
Lithuania	2883.438	1787.524	2206.093	9181.288
Ukraine	2883.104	1790.002	2206.508	9209.980
Mean value	2883.320	1789.474	2206.07	9186.384

Table 4

Specific values of the median annual income based on the cost of construction and indirect environmental costs associated with emission into the atmosphere of carbon dioxide for generating facilities in Armenia, Belarus, Iraq, Iran, Russia, Turkey (USA dollars)

Country	Wind	Gas	Solar	Hydro
Armenia	3295.848	5409.866	2564.969	20936.816
Iraq	3313.311	4563.766	2441.374	17081.528
Iran	3402.097	4309.873	2649.597	18000.798
Turkey	3398.212	5110.803	2635.719	15192.058
Belarus	2964.796	8229.654	2862.428	29808.656
Russia	3738.398	7370.530	2730.321	24985.256
Mean value	3352.110	5832.415	2647.401	21000.852

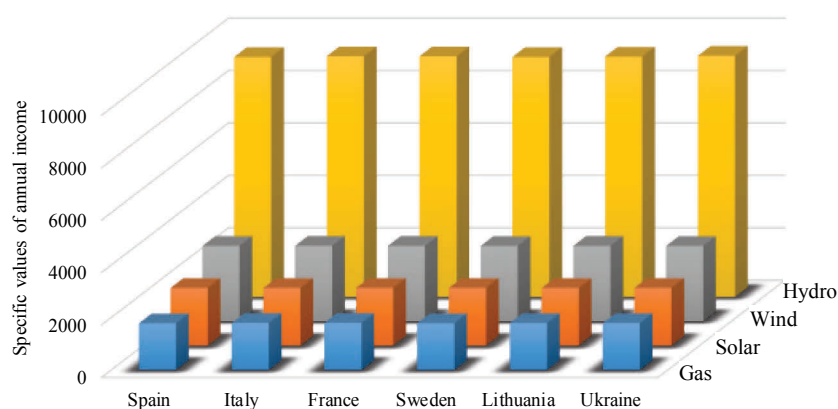


Fig. 5. Specific values of annual income, taking into account the construction cost and indirect environmental costs associated with emission into the atmosphere of carbon dioxide for generating facilities using different types of primary energy in the European Union countries and Ukraine (USA dollars)

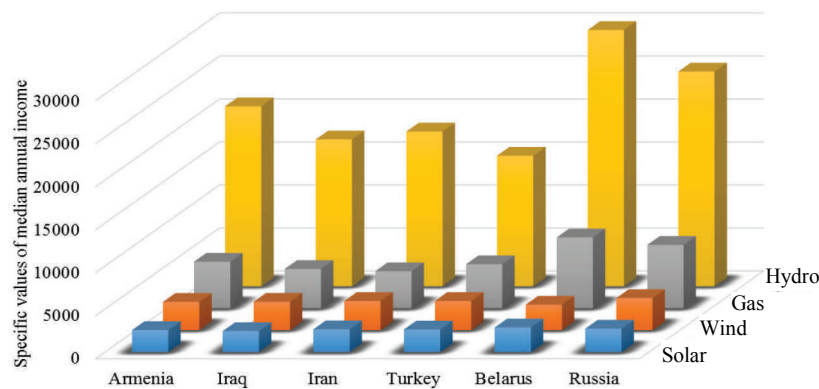


Fig. 6. Specific values of median annual income, taking into account the cost of construction and indirect environmental costs associated with emission into the atmosphere of carbon dioxide for generating facilities using different types of primary energy (USA dollars)

It is obvious that taking into account the specific costs of construction and indirect environmental costs associated with emission into the atmosphere of carbon dioxide, the ratio between generation capacities using conventional and alternative forms of energy varies substantially [14].

For the countries of the “European” group the “gas” power which is predominant in the absolute amounts of profits over the “wind” and “solar” ones but with the accounting environmental and economic efficiency is inferior to alternative methods of producing electrical energy (fig. 3, 5).

A similar effect is observed also for the countries of the second group. The ratio of economic efficiency of traditional and alternative methods of producing energy moves significantly towards the direction of the generating capacities that use energy of wind and Sun.

The degree of change in the ratio of the economic efficiency of generating facilities that use as primary energy renewable sources compared to the efficiency of facilities using the energy from the combustion of natural gas is presented in tab. 5, 6.

Table 5

Relative coefficients for the absolute annual profit and annual profit accounting specific cost of construction and minimization of the environmental impacts for 1 kW·h of energy produced (group 1)

	Wind/Gas	Solar/Gas	Hydro/Gas
1. Absolute profit	0.04	0.017	1.27
2. Profit accounting specific cost	1.60	1.200	5.10
2/1	40.00	70.100	4.02

Table 6

Relative coefficients for the absolute annual profit and annual profit accounting specific cost of construction and minimization of the environmental impacts for 1 kW·h of energy produced (group 2)

	Wind/Gas	Solar/Gas	Hydro/Gas
1. Absolute profit	0.03	0.02	1.25
2. Profit accounting specific cost	0.57	0.45	3.60
2/1	19.00	22.50	2.88

It is obvious that generating capacities that use as primary energy the Solar one have maximum environmental and economic efficiency in both groups of studied countries. The ecological-economic effectiveness of electricity production using solar energy will increase steadily with the prospect of reducing specific cost of construction solar-power stations in the next 30–35 years almost 2 times. This is true, in the first place, for the Islamic Republic of Iran, which has many sunny days and has little water reserves.

CONCLUSION

Analysis of the results has shown that ecological and economic efficiency of power generating installations using the energy of river runoff surpasses a similar indicator of the thermal power plants using natural gas by 3–4 times. Wind and heliostations surpass thermal installations in this indicator more than an order of magnitude. Hence, when planning prospects of development of power systems to cover the estimated growth of energy demand with respect to the Islamic Republic of Iran it is advisable to install units based on alternative energy sources, first of all, generating capacity using solar energy and wind energy.

REFERENCES

1. Ping Chen, Qiushi Xu (2014) Ecological Design and Research on Energy Saving of Industrial Building. *BioTechnology: An Indian Journal*, 17 (10), 9573–9577.
2. *Ecology and Energetics at the Ten Topics*. Moscow, NERA Publ, 2008. 68. Available at: http://nera.biodat.ru/documents/press-room/publications/for_children_and_ministers/book5.pdf.
3. RETScreen® International Clean Energy Decision Support Centre (2004) *Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook. Wind Energy Project Analysis Chapter*. Canada, Minister of Natural Resources. Available at: https://cop23.unfccc.int/resource/cd_roms/na1/mitigation/Module_5/Module_5_1/b_tools/RETScreen/Manuals/Wind.pdf (Accessed: 24 January 2012).
4. RETScreen® International Clean Energy Decision Support Centre (2004) *Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook. Small Hydro Project Analysis Chapter*. Canada, Minister of Natural Resources. Available at: <http://reca-corp.com/files/57897531.pdf> (Accessed: 24 January 2012).
5. Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook / Equipment for Combined Heat and Power. Canada, Minister of Natural Resources. Accessed: 24 January 2012.
6. Voropai N. I. (ed.), Belyaev L. S., Saneev B. G. (et al.) (2000) *System Investigations of Power Engineering Problems*. Novosibirsk, Science Publ., Siberian Branch. 558 (in Russian).
7. Bubnov V. P., Mehdizadeh M. A. (2013) Energy Resources of Iran and their Impact on the Environment. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 54–57 (in Russian).
8. *Business Iran. Vol. V. Economy and Relations with Russia in 2003–2005*. Moscow, Business-Press Agency, 2005. 27 (in Russian).
9. Ministry of Power Engineering of IRI. Energy Balance for 2012. *The Website of Ministry of Power Engineering of Islamic Republic of Iran*. Available at: <http://www.saba.org.ir/fa/energyinfo/tashilat/taraz> (Accessed: 25 November 2013).
10. Laptionok S. A., Mehdizadeh M. A. (2014) Prospects of Use of Alternative Sources of Electric Power in the Islamic Republic of Iran. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 51–66 (in Russian).

11. Bubnov V. P., Mehdizadeh M. A. Alternative Energy as the Energy Saving Element. *Sakharovskie Chteniya 2012: Ekologicheskie Problemy XXI veka* [Sakharov readings 2012: Ecological Problems of XXI century]. Proc. of 12th International Scientific Conf. Minsk / Ed. Kundas. ISEU named by A. A. Sakharov. 2012. p. 405 (in Russian).
12. Bubnov V. P., Dorozhko S. V., Laptionok S. A. (2009) *The Solution of Problems of Ecological Management Using the Methodology of System Analysis*. Minsk, Belarusian National Technical University. 266 (in Russian).
13. Bubnov V. P., Mehdizadeh M. A. The Model of Calculation of Indicators of Wind Energy. *Nauka – Obrazovaniyu. Proizvodstvu. Ekonomike. Materialy 11 Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. T. 4* [Science for Education, Industry, Economy. Proc. of the 11th International Scientific–Technical Conf. Vol. 4]. Minsk, Belarusian National Technical University, 497 (in Russian).
14. Gryning S.-E., Chaumerliac N. (eds.) (1998) *NATO Challenges of Modern Society. Vol. 22. Air Pollution Modeling and its Application XII*. New York, Plenum Press. 770. DOI: 10.1007/978-1-4757-9128-0.

Received: 28 November 2017 Accepted: 22 January 2018 Published online: 29 January 2018

ЛИТЕРАТУРА

1. Ping Chen. Qiushi Xu. Ecological Design and Research on Energy Saving of Industrial Building // BTAIJ. 2014. Vol. 17, No 10. P. 9573–9577.
2. Ecology and Energetics at the Ten Topics. Moscow. ANO “NERA”, 2008. 68 p.
3. Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook / Wind Energy Project Analysis Chapter – Minister of Natural Resources. Canada. Режим доступа: https://cop23.unfccc.int/esource/cd_roms/nal/mitigation/Module_5/Module_5_1/b_tools/RETScreen/Manuals/Wind.pdf (Дата доступа: 24.01.2012).
4. Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook / Small Hydro Project Analysis Chapter – Minister of Natural Resources. Canada. Режим доступа: <http://reca-corp.com/files/57897531.pdf> (Дата доступа: 24.01.2012).
5. Clean Energy Project Analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook / Equipment for Combined Heat and Power – Minister of Natural Resources. Canada. Дата доступа: 24.01.2012.
6. Системные исследования проблем энергетики / под ред. Н. И. Воропая. Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 2000. 558 с.
7. Бубнов, В. П. Энергетические ресурсы Ирана и их воздействие на окружающую среду / В. П. Бубнов, М. А. Мехдизадех // Энергетика. Известия высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 2. С. 54–57.
8. Деловой Иран. Т. V. Экономика и связи с Россией в 2003–2005 гг. М.: Агентство Бизнес-Пресс, 2005. 27 с.
9. Министерство энергетики ИРИ. Энергетический баланс за 2012 г. Сайт Министерства энергетики Исламской Республики Иран. Режим доступа: <http://www.saba.org.ir/fa/energyinfo/tashilat/taraz>. <http://per.moe.gov.ir/Home.aspx>. Дата доступа: 25.11.2013.
10. Лаптёнок, С. А. Перспективы использования альтернативных источников получения электрической энергии в Исламской Республике Иран / С. А. Лаптёнок, М. А. Мехдизадех // Энергетика. Известия высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 2. С. 51–66.
11. Бубнов, В. П. Нетрадиционная энергетика как элемент энергосбережения / В. П. Бубнов, М. А. Мехдизадех // Сахаровские чтения 2012 г.: экологические проблемы XXI в.: материалы 12-й Междунар. науч. конф., Минск. Республика Беларусь / под ред. С. П. Кундаса [и др.]. Минск: МГЭУ имени А. А. Сахарова, 2012. 486 с.
12. Бубнов, В. П. Решение задач экологического менеджмента с использованием методологии системного анализа / В. П. Бубнов, С. В. Дорожко, С. А. Лаптёнок. Минск: БНТУ, 2009. 266 с.
13. Бубнов, В. П. Модель расчета показателей энергии ветра / В. П. Бубнов, М. А. Мехдизадех // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11 Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. Минск: БНТУ, 2013. Т. 4. С. 497.
14. NATO Challenges of Modern Society. Vol. 22. Air Pollution Modeling and its Application XII. Edited by S.-E. Gryning and N. Chaumerliac. Plenum Press. New York, 1998. 770 p.

Поступила 28.11.2017 Подписана в печать 22.01.2018 Опубликовано онлайн 29.01.2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79

УДК 621.311

Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях

А. В. Овсянник¹⁾, Е. Н. Макеева¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(Гомель, Республика Беларусь)

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

Реферат. Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при пузырьковом кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на трубках с капиллярно-пористым покрытием. Исследования проводились на экспериментальной установке в условиях большого объема при давлениях насыщения $p_n = 0,9–1,4$ МПа и плотности теплового потока $q = 5–35$ кВт/м². Впервые получено критериальное уравнение для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении озонобезопасных хладагентов на поверхностях с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием. Опытные данные удовлетворительно обобщаются в широком интервале параметров пористого слоя: давлений ($p_n = 0,9–1,4$ МПа) и тепловых нагрузок ($q = 5–35$ кВт/м²). Соотношение позволяет вычислять коэффициенты теплоотдачи с погрешностью ± 20 %. Предложенная зависимость может быть использована в инженерных расчетах характеристик теплообменных аппаратов испарительного типа. Коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием в четыре раза выше, чем на гладкой, и в 1,5 раза выше, чем на оребренной поверхности, что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Кипение на капиллярно-пористых покрытиях приводит к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными.

Ключевые слова: теплообмен при кипении, парообразование, озонобезопасный хладагент, интенсивность теплообмена, коэффициент теплоотдачи, капиллярно-пористое покрытие, испаритель, теплообменный аппарат, холодильная установка, эмпирическая зависимость

Для цитирования: Овсянник, А. В. Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 70–79. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79

Адрес для переписки

Овсянник Анатолий Васильевич
Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого,
просп. Октября, 48,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-20-36
Ovsyannik@tut.by

Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.
Gomel State Technical University
named after P. O. Sukhoi,
48 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-20-36
Ovsyannik@tut.by

Determining of Parameters of Heat Exchange for Vaporization of the Mixed Refrigerant on the High Thermal Conductivity Sintered Powder Capillary-Porous Coatings

A. V. Ovsyannik¹⁾, E. N. Makeeva¹⁾

¹⁾Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The results of experimental research of heat exchange under the nucleate boiling of refrigerants R404a, R407c and R410a on the tubes with capillary-porous coating are presented. Experimental studies were carried out with the aid of an experimental installation in conditions of a large volume at pressures of saturation $p_{\text{н}} = 0.9\text{--}1.4$ MPa and densities of the heat flux $q = 5\text{--}35$ kW/m². For the first time the criterion equation for the calculation of the intensity of heat transfer during evaporation of ozone safe refrigerants on surfaces with high thermal conductivity sintered capillary-porous coating was obtained. Experimental data are summarized satisfactorily in a wide range of parameters of the porous layer, i.e. the pressure ($p_{\text{н}} = 0.9\text{--}1.4$ MPa) and heat loads ($q = 5\text{--}35$ kW/m²). The ratio makes us possible to calculate the heat transfer coefficients within ± 20 %. The dependence can be used in engineering calculations of the characteristics of the heat exchangers of the evaporative type. The coefficient of heat transfer during boiling of refrigerants on the investigated surfaces with the sintered capillary-porous coating, 4 times higher than on a smooth one and 1.5 times higher than on the finned surface, that allows us to come to a conclusion about the advantage of porous coatings. Boiling in capillary-porous coating leads to a decrease in weight and size of the installations due to the heat exchange intensification and the size of the tubes smaller as compared to the size of the finned ones.

Keywords: boiling heat exchange, steam generation, ozone-friendly refrigerant, heat exchange rate, heat transfer coefficient, capillary-porous coating, evaporator, heat exchanger, refrigeration unit, empirical relationship

For citation: Ovsyannik A. V., Makeeva E. N. (2018) Determining of Parameters of Heat Exchange for Vaporization of the Mixed Refrigerant on the High Thermal Conductivity Sintered Powder Capillary-Porous Coatings. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 70–79. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79 (in Russian)

Введение

Одним из наиболее эффективных способов интенсификации теплообмена при кипении является применение пористых металлических покрытий. Пористая структура образуется в результате покрытия поверхности трубы тонкими металлическими сетками либо нанесения на нее металлического порошка определенной зернистости. При этом образуется пористый слой с разветвленной системой сообщающихся между собой капиллярных каналов, через которые происходят эвакуация пара и подпитка пористой структуры жидкостью, подтекающей сюда под действием сил поверхностного натяжения. Кипение происходит как внутри пористого покрытия, так и на его поверхности. Высокая интенсивность теплообмена свидетельствует о том, что пористая структура создает весьма благоприятные условия для зарождения и роста паровых пузырей. Например, авторы [1] указывают, что при кипении *n*-бутана ($p = 1,27 \cdot 10^5$ Па) на гладкой трубе образование паровых пузырей по всей ее поверхности наблюдалось только при $q = 35$ кВт/м², а на трубе с пористым покрытием вся ее поверх-

ность была занята паровыми пузырями уже при $q = 1,5 \text{ кВт/м}^2$. Эти и многие другие опыты показали, что устойчивое развитое кипение на поверхностях с пористыми покрытиями устанавливается при весьма незначительных температурных напорах (перегревах жидкости). Основной причиной этого является то, что в данном случае поверхности раздела фаз возникают внутри пористого слоя. При выбросе паровой фазы из пористой структуры в последней всегда остаются паровые включения, в которые испаряется тонкая пленка жидкости, обволакивающая стенки капиллярных каналов [1]. Испарение микропленки происходит по всей поверхности капиллярного канала, высота которого равна толщине пористого покрытия. Таким образом, элементы пористой структуры сами являются центрами зарождения паровой фазы. Так как диаметр капиллярных каналов больше критического диаметра обычного центра парообразования, испарение пленки в паровые включения или с поверхности капилляра требует значительно меньшего перегрева жидкости. Не менее значимо и то, что в пористой структуре перегрев поступающей в капилляры жидкости происходит в условиях весьма высокой интенсивности теплообмена. В условиях сильно развитой поверхности пористого слоя только за счет подогрева жидкости можно отводить от стенки весьма большие тепловые потоки. Снижение необходимого перегрева, а также интенсивный подогрев жидкости существенно уменьшают время «молчания» центров парообразования, что также способствует интенсификации теплообмена на трубах с пористыми структурами [2].

Анализируемая капиллярно-пористая высокотеплопроводная поверхность может рассматриваться как близкая к идеальной при условиях (рис. 1), когда:

1) спеченную высокотеплопроводную капиллярно-пористую структуру необходимо рассматривать как поверхность, образованную шипами, состоящими из частиц одинакового размера;

2) темп активации новых пузырьков пара должен быть пропорциональным изменению плотности теплового потока, чтобы исключить дополнительный перегрев стенки;

3) подводимая к теплоотдающей поверхности теплота расходуется на образование новых активных центров, а не на интенсификацию теплоотдачи за счет уже существующих. Причем интенсивность образования новых центров парообразования должна быть пропорциональна изменению тепловой нагрузки;

4) независимость изменения температуры от плотности теплового потока должна иметь место при небольших значениях q (для второго участка), так как в противном случае интенсивное образование новых центров парообразования при увеличении q приведет к значительному возрастанию количества паровой фазы и, в конечном итоге, к запариванию поверхности теплообмена и резкому падению интенсивности теплоотдачи.

Покрытия из пористых структур широко используются в элементах систем охлаждения радиоэлектронной, космической аппаратуры, энергетических установок, в качестве фитилей в различных типах тепловых труб.

В связи с их широким применением актуально изучение характера влияния тех или иных параметров на процессы кипения на пористых покрытиях с целью дальнейшего прогнозирования характеристик устройств, составляющими частями которых являются поверхности с пористым покрытием [3, 4].

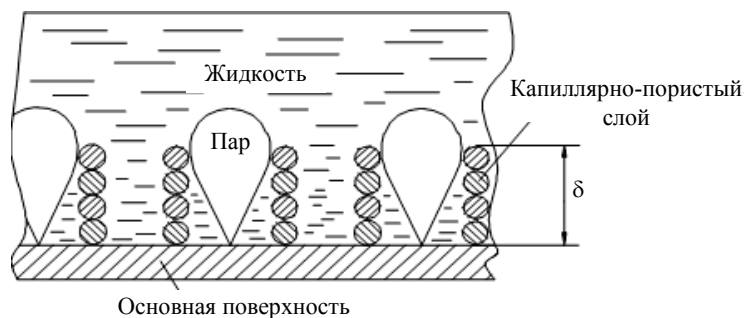


Рис. 1. Схема идеализированной капиллярно-пористой поверхности

Fig. 1. Diagram of an idealized capillary-porous surface

Известен ряд экспериментальных работ, в которых изучалось влияние поверхностных эффектов на кипение, однако результаты их недостаточны для построения обоснованных обобщений, а многие выводы противоречивы.

Цель данной работы – экспериментальное исследование процесса теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях; установление обобщенных зависимостей для определения коэффициентов теплоотдачи и влияния на них различных факторов, определяющих интенсивность теплоотдачи при фазовых переходах в аппаратах холодильных и теплонасосных установок.

Анализ экспериментальных исследований

В настоящей работе представлены результаты исследования теплообмена при кипении фреонов R407c, R404a, R410a на трубках с капиллярно-пористым покрытием. Исследования проводились на экспериментальной установке в условиях большого объема при давлениях насыщения $p_n = 0,9\text{--}1,4$ МПа и плотности теплового потока $q = 5\text{--}35$ кВт/м² на экспериментальном стенде, описанном в [5].

Для проведения экспериментов были изготовлены образцы с пористой поверхностью, представляющие собой горизонтальные медные трубы $\varnothing 26 \times 2$ мм, на наружную поверхность которых напеклась капиллярно-пористая структура из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н (рис. 2). Изготовление капиллярно-пористой структуры осуществлялось методом спекания свободной засыпки медного порошка в среде аргона в течение 1 ч при температуре от 1030 до 1050 °С. Для формования пористой структуры использовали оснастку из двух втулок – наружной из коррозионной стали

и медной втулки образца. Спексаемый порошок засыпали в свободное пространство между втулками. Втулки устанавливали на подложку из коррозионно-стойкой стали. Для предотвращения диффузии меди и припекания медного порошка поверхность наружной втулки предварительно подвергалась термообработке на воздухе в течение 3 ч при температуре 700 °С, в результате чего на ней образовывалась защитная окисная пленка. С целью получения образцов с разной толщиной капиллярно-пористой структуры применяли наружные втулки с разным внутренним диаметром. В процессе спекания медного порошка происходили его центральная усадка и припекание к медной втулке. Для обеспечения надежного припекания порошка предварительно производилась активация наружной поверхности медной втулки посредством пескоструйной обработки. Благодаря усадке после спекания и охлаждения до комнатной температуры медная втулка с напеченным слоем капиллярно-пористой структуры свободно извлекалась из наружной втулки [6].

Для всех исследованных спеченных капиллярно-пористых структур из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н, изготовленных методом свободной засыпки, открытая пористость составляла 50–55 %. Втулка с нанесенным на нее покрытием плотно надевалась на гладкий образец. Для исключения попадания хладагента незначительный зазор между гладким образцом и медной втулкой заполнялся терморастой.

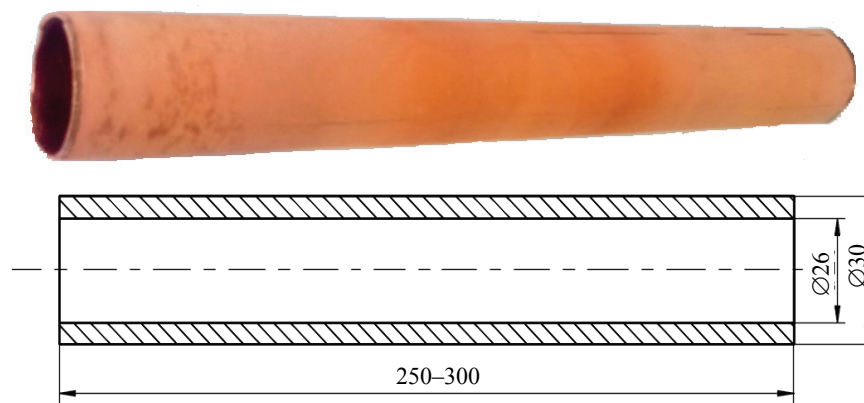


Рис. 2. Медный образец с пористым покрытием

Fig. 2. A copper sample with porous coating

Характеристики исследованных образцов приведены в табл. 1.

Визуальные наблюдения за процессом кипения показали наличие устойчивого пузырькового кипения на поверхностях с пористыми покрытиями в области малых тепловых нагрузок, при которых для ребристых и особенно гладких труб характерен режим свободной конвекции. При этом число стабильно действующих центров парообразования существенно выше, а отрывные размеры пузырей меньше, чем на гладких поверхностях (рис. 3).

Таблица 1

Параметры пористого покрытия
The parameters of the porous coating

№ образца	Толщина слоя пористого покрытия δ , мм	Диаметр частиц $d_{\text{ч}}$, мкм	Пористость, %
1	0,5	50	50–55
2	100	100	
3	0,7	50	
4		100	
5	1,0	50	
6		100	



Рис. 3. Процесс развитого пузырькового кипения на поверхности образца с капиллярно-пористым покрытием

Fig. 3. The process of the developed nucleate boiling on the surface of the sample with capillary-porous coating

Экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием с различной толщиной и средним диаметром частиц представлены на рис. 4.

Более значительная интенсивность теплоотдачи наблюдалась при толщине слоя пористого покрытия 1 мм и диаметре частиц 100 мкм (рис. 4а).

Увеличение давления приводит к значительному возрастанию интенсивности теплоотдачи, однако выбор его оптимального значения будет определяться множеством факторов, в частности обеспечением безопасности, надежности установки, ее массогабаритными показателями и энергоемкостью. При тепловых потоках более 30 кВт/м² влияние давления на коэффициент теплоотдачи менее заметно. Это подтверждает график, изображенный на рис. 4б.

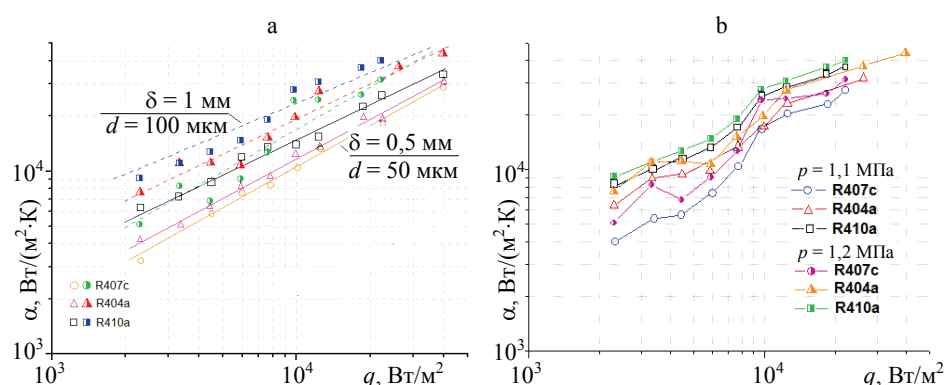


Рис. 4. Экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием:
а – при различной толщине и среднем диаметре частиц;
б – при различных давлениях насыщения

Fig. 4. The experimental dependence $\alpha = f(q)$ when R407c refrigerants, R404a and R410a are boiling on the surface of the sintered capillary-porous coating:
а – in case of various thickness and average particle diameter;
б – in case of different saturation pressures

Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на различных типах поверхностей приведено на рис. 5а. Используются данные при кипении на ребренной поверхности с трапециевидным профилем ребра и пористой поверхности толщиной 1 мм и средним диаметром частиц 100 мкм.

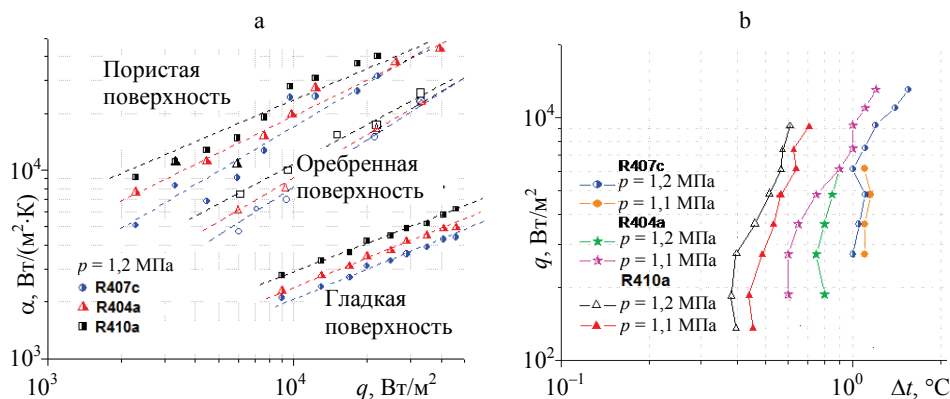


Рис. 5. Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреонов R407c, R404a и R410a:
а – экспериментальные зависимости $\alpha = f(q)$ для различных типов поверхности;
б – экспериментальные зависимости $q = f(\Delta t)$ на пористой поверхности

Fig. 5. Comparison of heat exchange intensity in boiling of freons R407c, R404a and R410a:
а – experimental dependencies $\alpha = f(q)$ for different surface types;
б – experimental dependencies $q = f(\Delta t)$ on a porous surface

Как видно из рис. 5а, коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием значительно выше, чем на гладкой (в четыре раза) и ребренной (в 1,5 раза), что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Применение испарительных трубок с нанесенным капиллярно-

пористым покрытием приведет к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными. Интенсификация процесса теплообмена при кипении фреонов наблюдалась во всем исследованном диапазоне тепловых нагрузок.

На рис. 5b показана зависимость подводимой тепловой нагрузки от температурного напора. Из графика видно, что при повышении давления температурные напоры снижаются, однако рост Δt с увеличением нагрузки происходит более интенсивно, что может привести к возникновению кризиса теплообмена при более низких тепловых потоках [7, 8]. Наименьшие температурные напоры наблюдались при кипении хладагента R410a.

Аналитическое решение задачи о теплообмене при кипении представляется весьма проблематичным из-за большого количества факторов, влияющих на процесс, а также сложной взаимосвязи между ними. Трудным оказывается также получение приближенной эмпирической зависимости, имеющей ясный физический смысл. Приведенные в литературе расчетные соотношения для определения интенсивности теплообмена на спеченных покрытиях оказались непригодными для обобщения опытных данных настоящей работы. Поэтому при проведении анализа и выводе обобщающего уравнения учитывались бесспорно установленные экспериментальные факты и рассматривались наиболее существенные для данного процесса связи [9, 10].

При обобщении экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении хладагентов на медных спеченных капиллярно-пористых структурах в условиях большого объема была получена следующая критериальная зависимость:

$$Nu = 45 K_{\text{кс}}^{0,7} K^{0,9} Pr^{0,6}, \quad (1)$$

или в развернутом виде:

$$\frac{\alpha \bar{d}_0}{\lambda_{\text{ж}}} = 45 \cdot \left(\frac{\delta_{\text{кс}}}{\bar{d}_0} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{q}{r \rho_{\text{п}} \omega''} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{v}{a} \right)^{0,6}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $\bar{d}_0$ – средний гидравлический размер пор, м; $\lambda_{\text{ж}}$ – теплопроводность жидкости, Вт/(м·К); $\delta_{\text{кс}}$ – толщина капиллярной структуры, м; q – плотность теплового потока, Вт/м²; ω'' – скорость роста паровых пузырей, м/с; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Физические свойства жидких и парообразных хладагентов взяты на линии насыщения.

Обобщающая кривая экспериментальных данных по теплообмену при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на поверхностях с пористым покрытием в соответствии с соотношением (2) представлена на рис. 6.

График показывает, что опытные данные удовлетворительно обобщаются в широком интервале параметров пористого слоя – давлений ($p_{\text{н}} = 0,9\text{--}1,4$ МПа) и тепловых нагрузок ($q = 5\text{--}35$ кВт/м²). Соотношение (2)

позволяет вычислять коэффициенты теплоотдачи α с погрешностью $\pm 20\%$. Предложенная зависимость может использоваться в инженерных расчетах характеристик теплообменных аппаратов испарительного типа.

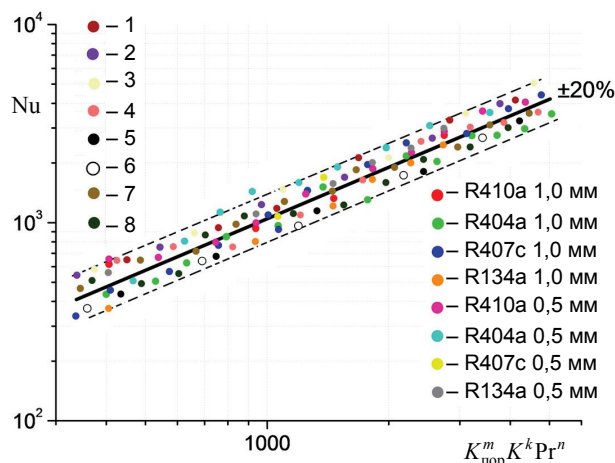


Рис. 6. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на поверхности со спеченной пористой структурой при давлении $p_n = 1,2$ МПа с различной толщиной покрытия с помощью зависимости (2); 1, 2, 3, 4 – при давлении $p_n = 1,3$ МПа; 5, 6, 7, 8 – при давлении $p_n = 1,1$ МПа

Fig. 6. Generalization of experimental data on heat transfer during boiling of refrigerants R404a, R407c and R410a on the surface of the sintered porous structure at a pressure of $p_n = 1.2$ MPa with different coating thickness with the use of the dependency (2); 1, 2, 3, 4 – at a pressure of $p_n = 1.3$ MPa; 5, 6, 7, 8 – at a pressure of $p_n = 1.1$ MPa

ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования теплообмена при кипении смесевых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c и R410a на поверхностях с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием при следующих режимных параметрах: давлении насыщения $p_n = 0,9\text{--}1,4$ МПа, температуре насыщения $t_n = (12,9\text{--}28,5)$ °С, плотности теплового потока $q = 5\text{--}35$ кВт/м².

2. Получено критериальное уравнение для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении озонобезопасных хладагентов на поверхностях с высокотеплопроводным спеченным капиллярно-пористым покрытием. Опытные данные удовлетворительно обобщаются в широком интервале параметров пористого слоя – давлений ($p_n = 0,9\text{--}1,4$ МПа) и тепловых нагрузок ($q = 5\text{--}35$ кВт/м²). Соотношение позволяет вычислять коэффициенты теплоотдачи α с погрешностью $\pm 20\%$. Предложенная зависимость может быть использована в инженерных расчетах характеристик теплообменных аппаратов испарительного типа.

3. Коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием в четыре раза выше, чем на гладкой, и в 1,5 раза выше, чем на оребренной поверхности, что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Кипение на капиллярно-пористых покрытиях приводит к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кичатов, Б. В. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена при взаимодействии двухфазных потоков с пористой средой / Б. В. Кичатов. М., 2000. 235 с.
2. Смирнов, Г. Ф. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах / Г. Ф. Смирнов, А. Д. Цой. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 439 с.
3. Овсянник, А. В. Теплообмен при кипении на развитых поверхностях / А. В. Овсянник. Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2004. 371 с.
4. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2012. 284 с.
5. Исследование тепло- и массопереноса при фазовых превращениях однокомпонентных и смесевых озонобезопасных хладагентов: отчет о НИР (заключит.) / ГГТУ имени П. О. Сухого; рук. темы А. В. Овсянник. Гомель, 2015. 101 с. № ГР 20141921.
6. Интенсификация теплообмена при фазовых переходах в пористых покрытиях источников тепловыделения: отчет о НИР (заключит.) / АНК ИТМО НАНБ; рук. темы Л. Л. Васильев. Минск, 2000. 73 с. № ГР 19981975.
7. Шаповалов, А. В. Теплоотдача при парообразовании в пористой структуре в условиях большого объема и капиллярного транспорта жидкости к зонам генерации пара / А. В. Шаповалов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та имени П. О. Сухого. 2005. № 2. С. 15–22.
8. Кичатов, Б. В. Кипение жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями / Б. В. Кичатов, В. М. Поляев // Теплоэнергетика. 1999. № 3. С. 72–76.
9. Обобщение экспериментальных данных по теплообмену при кипении пропана на медных спеченных капиллярно-пористых покрытиях / Л. Л. Васильев [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та имени П. О. Сухого. 2001. № 2. С. 3–13.
10. Новиков, М. Н. Интенсификация теплообмена при кипении пропана на пористых покрытиях / М. Н. Новиков. Минск, 2001. 180 с.

Поступила 11.04.2017 Подписана в печать 20.06.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Kichatov B. V. (2000) *Modeling of Processes of Hydrodynamics and Heat Transfer in the Interaction of Two-Phase Flows with a Porous Medium*. Moscow. 235 (in Russian).
2. Smirnov G. F., Tsoi A. D. (1999) *The Heat Transfer During Evaporation in Capillaries and Capillary-Porous Structures*. Moscow, MPEI Publ. 439 (in Russian).
3. Ovsyannik A. V. (2004) *The Boiling Heat Transfer on the Developed Surfaces*. Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. 371 (in Russian).
4. Ovsyannik A. V. (2012) *Modeling of Heat Transfer in Boiling Liquids*. Gomel, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. 284 (in Russian).
5. Ovsyannik A. V. (head) (2015) *The Study of Heat and Mass Transfer at Phase Transformations of One-Component and Mixture Ozone-Safe Refrigerants: Research Report (Final)*. No SR 20141921. Gomel, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. 101 (in Russian).
6. Vasil'ev L. L. (head) (2000) *Intensification of Heat Transfer at Phase Transitions in Porous Coatings of Heat Sources: Research Report (Final)*. No SR 19981975. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. 73 (in Russian).
7. Shapovalov A. V. (2005) Heat Transfer in Evaporation in a Porous Structure with a Large Volume and Capillary Fluid Transport to Areas of Steam Generation. *Vestn. Gomel'skogo Gos. Tekhn. Un-ta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi], (2), 15–22 (in Russian).
8. Kichatov B. V., Polyayev V. M. (1999) The Boiling of Liquid on Surfaces with Porous Coatings. *Teplotenergetika = Thermal Engineering*, (3), 72–76 (in Russian).
9. Vasil'ev L. L., Zhuravlev A. S., Ovsyannik A. V., Novikov M. N. (2001) Generalization of Experimental Data on Boiling Heat Transfer of Propane on Copper Sintered Capillary-Porous Coating. *Vestn. Gomel'skogo Gos. Tekhn. Un-ta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi], (2), 3–13 (in Russian).
10. Novikov M. N. (2001) *Intensification of Heat Transfer at Propane Boiling on a Porous Coatings*. Minsk. 180 (in Russian).

Received: 11 April 2017

Accepted: 20 June 2017

Published online: 29 January 2018

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92

УДК 628.112

Теоретические исследования процесса выщелачивания кольматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации

И. Е. Иванова¹⁾, В. В. Ивашечкин¹⁾, В. В. Веременик¹⁾

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

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

Реферат. В процессе работы водозаборных скважин происходит снижение их удельного дебита в результате механического, биологического и химического кольматажа. Извлечение кольматанта из фильтра осложняется тем, что отложения охватывают не только фильтр скважины, но и гравийную обсыпку и не удаляются полностью при обработках. Предложена установка для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин, состоящая из компрессора, шлангов и погружного устройства, выполненного в виде двухкамерного пневматического насоса вытеснения. Преимуществом установки являются отсутствие в ее составе циркуляционного насоса и возможность эффективной обработки ограниченного интервала фильтра. Скважинное погружное устройство не содержит движущихся частей за исключением двух плавающих обратных клапанов. Для описания процесса растворения отложений способом реверсивно-реагентной регенерации скважин использована система уравнений: объединенного уравнения движения и сохранения массы и обобщенного уравнения кинетики. Путем интегрирования уравнения кинетики получена аналитическая зависимость для расчета продолжительности работы установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров, по истечении которой удельный объем кольматирующих отложений в гравийной обсыпке будет снижен до заданного уровня. По полученным формулам была составлена компьютерная программа, позволяющая рассчитать количество циклов работы устройства, продолжительность очистки и степень удаления кольматанта на каждом этапе работы. С помощью разработанной компьютерной программы рассмотрена работа установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров на примере водозаборной скважины с использованием двух различных реагентов: соляной кислоты и дитионита натрия. Приведена методика расчета количества реагента, необходимого для восстановления производительности скважин.

Ключевые слова: регенерация, водозаборная скважина, кольматант, гравийный фильтр, реверсивно-реагентная обработка, реагент, соляная кислота, дитионит натрия

Для цитирования: Иванова, И. Е. Теоретические исследования процесса выщелачивания кольматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации / И. Е. Иванова, В. В. Ивашечкин, В. В. Веременик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 80–92. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 268-84-50
gts@bntu.by

Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosti Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 268-84-50
gts@bntu.by

Theoretical Studies of the Leaching Process of the Mudding Element in the Gravel Package of the Well Filter Using the Unit for Reverse-Reagent Regeneration

I. E. Ivanova¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, V. V. Veremenyuk¹⁾

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

Abstract. During the operation of water wells, their specific production rate is reduced as a result of mechanical, biological and chemical colmatage. The extraction of the mudding element from the filter is complicated by the fact that the deposits cover not only the well filter, but also gravel package and are not completely removed by the treatment. An installation is proposed for reverse-reagent regeneration of water wells, consisting of a compressor, hoses and submersible device in the form of a two-chamber pneumatic displacement pump. The advantage of the unit is the absence of a circulating pump in its composition and the possibility of efficient processing of the limited filter interval. The downhole submersible device does not contain moving parts except for two floating check valves. In order to describe the process of dissolution of deposits by the method of reverse-reagent water well regeneration, a system of equations is used: the combined equation of motion and mass conservation and the generalized equation of kinetics. By integrating the kinetics equation, an analytical dependence is obtained to calculate the operating time of the unit for reverse-reagent filter regeneration, followed by the reducing of the specific volume of the colmatizing deposits in the gravel package to a predetermined level. According to the formulas obtained, a computer program was compiled, which allows calculating the number of operating cycles of the device, the duration of cleaning and the degree of removal of the colmatant at each stage of the work. With the aid of the developed computer program, the operation of the unit for reverse-reagent filter regeneration is considered on behalf of a water well using two different reagents: hydrochloric acid and sodium dithionite. The procedure for calculating the amount of reagent needed to restore water well productivity is presented.

Keywords: regeneration, water well, mudding element, gravel filter, reverse-reagent treatment, reagent, hydrochloric acid, sodium dithionite

For citation: Ivanova I. E., Ivashechkin V. V., Veremenyuk V. V. (2018) Theoretical Studies of the Leaching Process of the Mudding Element in the Gravel Package of the Well Filter Using the Unit for Reverse-Reagent Regeneration. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 80–92. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92 (in Russian)

Введение

Хозяйственно-питьевое водоснабжение Республики Беларусь основано на подземных водах, для добычи которых в стране пробурено более 36 тыс. водозаборных скважин. Вместе с тем в настоящее время около 90 % скважин эксплуатационного фонда работает со сниженной производительностью, а их средний срок службы редко превышает 18–20 лет, что существенно ниже расчетных показателей. Это обусловлено тем, что в процессе работы скважин происходит снижение их удельного дебита в результате процессов механического, биологического и химического кольматажа. Проводимые в настоящее время мероприятия по декольматажу скважин импульсными методами не всегда эффективны из-за низкой степени извлечения отложений. Особенно это характерно для длительно эксплуатирующихся скважин, в которых отложения охватывают всю гравийную обсыпку и не удаляются полностью при обработках. Заслуживают внимания циркуляционные

методы регенерации [1–3], в которых химическое растворение отложений происходит более интенсивно, чем в режиме «реагентной ванны» и «циклического задавливания» реагента, где реагент неравномерно очищает фильтр из-за утечек в пласт через наиболее проницаемые участки [4].

Процесс выщелачивания кольматирующих отложений в гравийной обсыпке скважин рассматривается в литературе как химическая гетерогенная реакция, в ходе которой кристаллические связи компонентов кольматанта разрушаются, ионные связи разрываются и компоненты переходят в раствор. Такие реакции протекают в несколько стадий: перенос реагента (растворителя) к поверхности, на которой происходит реакция; собственно химическая реакция; отвод продуктов реакции от поверхности [4]. Общая продолжительность процесса зависит от скоростей отдельных стадий, причем определяющей является стадия, протекающая медленнее остальных. Результаты исследований кинетики растворения твердых веществ в жидкостях при различных гидродинамических условиях приведены в работах Г. А. Аксельруда и А. Д. Молчанова [5], Г. А. Аксельруда и В. М. Лысянского [6].

Технология регенерации фильтров циркуляционными скважинными устройствами не получила распространения из-за сложности и уникальности технологического оборудования. Поэтому разработка эффективных и достаточно простых в эксплуатации реагентных технологий для регенерации водозаборных скважин является актуальной задачей. В работе В. В. Ивашечкина, П. А. Автушко и В. В. Вереме́нчука [7] был описан процесс выщелачивания отложений при циркуляционном радиальном движении реагента через слой гравийной обсыпки.

В БНТУ предложена установка для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин, состоящая из компрессора, шлангов и погружного устройства, выполненного в виде двухкамерного пневматического насоса вытеснения [8]. Реагент здесь перемещается между двумя пневмокамерами насоса, установленными на разных уровнях по высоте фильтра, через слой обсыпки в вертикальном направлении. Преимуществом установки являются отсутствие в ее составе циркуляционного насоса и возможность эффективной обработки ограниченного интервала фильтра. Скважинное погружное устройство не содержит движущихся частей за исключением двух плавающих обратных клапанов.

Анализ литературы показал, что в ней отсутствуют методики расчета продолжительности процесса выщелачивания при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации. Поэтому цель исследований – разработать методику расчета продолжительности работы установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров, по истечении которой удельный объем кольматирующих отложений в гравийной обсыпке будет снижен до заданного уровня.

Основная часть

Расчетная схема реверсивного движения фильтрового потока в гравийной обсыпке при использовании установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров представлена на рис. 1.

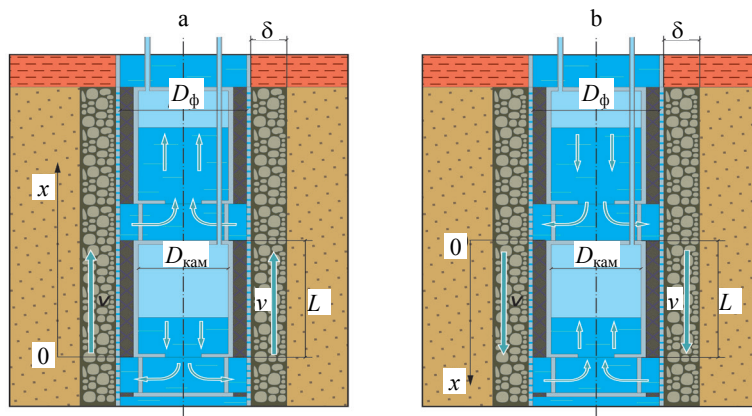


Рис. 1. Расчетная схема реверсивного движения фильтрового потока в гравийной обсыпке:
а – восходящий поток; б – нисходящий поток

Fig. 1. The design scheme of the reverse motion of the filter flow in a gravel package:
a – upward flow; b – down flow

Рассмотрим возвратно-поступательное движение реагента. Каждый цикл состоит из двух ходов: восходящее и нисходящее движение. По интенсивности движения ходы равноценные.

Первый ход (восходящее движение)

Для описания процесса растворения отложений в обсыпке фильтра при продавливании раствора реагента концентрации C со скоростью v на участке длиной L (рис. 1а) будем использовать объединенное уравнение движения и сохранения массы для линейного потока [9]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - v \frac{\partial C}{\partial x} - \rho_{\text{ос}} \frac{\partial b}{\partial t} = n_0 \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (1)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии; n_0 – начальная пористость грунта; b – удельная насыщенность грунта кольматантом, плотность которого $\rho_{\text{ос}}$.

Принимаем прифильтровую зону однородной, движение – квазиустановившимся. Согласно Н. Н. Веригину [10], при больших значениях критерия Пекле ($Pe = v_c d / D$), когда скорость фильтрации значительно больше скорости диффузии, в первом слагаемом этого уравнения принимают $D = 0$. Добавляем уравнение кинетики [4] и получаем систему:

$$\begin{cases} -v \frac{\partial C}{\partial x} - \rho_{\text{ос}} \frac{\partial b}{\partial t} = n_0 \frac{\partial C}{\partial t}; \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi(C_m - C), \end{cases} \quad (2)$$

где C_m – максимальная концентрация солей в реагенте (концентрация насыщенного раствора); $\Phi = \frac{B_i}{\rho_{\text{ос}}} f(b)$; $f(b) = \frac{1}{\sqrt{1-n_0}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_0} - b} - 1$;

$$B_i = A_1 \left(\frac{D^4}{\nu_c} \right)^{1/6} \cdot \omega_0 \sqrt{\frac{\nu}{d_0}}; \quad A_1 - \text{константа, лежащая в интервале от } 0,760$$

до 0,996 [4]; D – коэффициент молекулярной диффузии; ν_c – коэффициент кинематической вязкости жидкости; ω_0, d_0 – удельная поверхность и размер зерен незакольматированной гравийной обсыпки скважины.

В выражение для расчета суммарной поверхности ω_0 зерен шаровой формы диаметром d_0 в единице объема $\omega_0 = 6 \frac{1-n_0}{d_0}$ [11] следует ввести понижающие коэффициенты ξ и ζ , учитывающие соответственно степень экранизации поверхности зерен пузырьками газа и долю нерастворимых соединений в составе кольматанта. Тогда $\omega_0 = 6\xi\zeta \frac{1-n_0}{d_0}$. Для решения конкретной задачи ставим начальные и граничные условия:

$$C(0, x) = C_0; \quad C(t, 0) = C_0; \quad b(0, x) = b_0 < n_0, \quad t \geq 0, \quad x \in [0; L]. \quad (3)$$

Для упрощения расчетов функцию $f(b)$ будем определять при среднем удельном объеме отложений b_c . Далее положим $\tilde{C}(t, x) = C_m - C(t, x)$ и преобразуем задачу (2), (3):

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + a \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + w \tilde{C} = 0; \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi_c \tilde{C}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{C}(0, x) = \tilde{C}(t, 0) = C_{01}; \quad C_{01} = C_m - C_0; \quad (5)$$

$$b(0, x) = b_0, \quad (6)$$

$$\text{где } a = \frac{\nu}{n_0}; \quad w = \frac{\alpha_1}{n_0}; \quad \alpha_1 = B_i f(b_c); \quad \Phi_c = \frac{\alpha_1}{\rho_{oc}}.$$

Задача (4) и (6) решается следующим образом. Приводим уравнение (4) к виду

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} + wu = 0, \quad (7)$$

удовлетворяющему условиям:

$$u(0, x) = u_0 = u(t, 0), \quad t \geq 0, \quad x \in [0; L]. \quad (8)$$

Коэффициенты a и w предполагаются постоянными.

Уравнения (8) и (9) решаются методом Лапласа и после преобразования принимают вид

$$u = u_0 e^{-\frac{wx}{a}} H\left(t - \frac{x}{a}\right) + u_0 e^{-wt} \left(H(t) - H\left(t - \frac{x}{a}\right) \right), \quad (10)$$

где $H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$ – функция Хевисайда.

Анализируя полученное выражение (10), делаем выводы:

$$1) \text{ пусть } T_x = \frac{x}{a}. \text{ Тогда } u = u_0 \cdot e^{-\frac{wx}{a}} \text{ при } t \geq T_x \text{ и любом } x \in [0; L]; \quad (11)$$

$$2) \text{ для любого } x \in [0; L] \text{ } u = u_0 \cdot e^{-wt} \text{ при } t < T_x. \quad (12)$$

Тогда согласно (11) и (12):

$$1) \tilde{C}(t, x) = C_{01} \cdot e^{-\alpha_1 \frac{x}{v}} \text{ при } t \geq T_x \text{ и любом } x \in [0; L]; \quad (13)$$

$$2) \tilde{C}(t, x) = C_{01} \cdot e^{-wt} \text{ при } t < T_x \text{ и любом } x \in [0; L]. \quad (14)$$

Отметим, что величина $T_x = \frac{x}{a} = n_0 \frac{x}{v}$ имеет размерность времени.

Положим $T_0 = \frac{L}{v}$ – время, за которое расстояние L проходится со скоростью v . Тогда из (5), (7), (13), (14) находим удельную загрязненность в момент времени T_0 для любого $x \in [0; L]$

$$\begin{aligned} b(T_0, x) - b_0 &= -\Phi_c \int_0^{T_0} \tilde{C}(t, x) dt = -\Phi_c \int_0^{T_x} \tilde{C}(t, x) dt - \Phi_c \int_{T_x}^{T_0} \tilde{C}(t, x) dt = \\ &= -\frac{n_0 C_{01}}{\rho_{oc}} \left(1 - e^{-\alpha_1 \frac{x}{v}} \right) - \frac{\alpha_1 C_{01} e^{-\alpha_1 \frac{x}{v}}}{\rho_{oc}} \left(T_0 - \frac{n_0 x}{v} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Отметим, что $\frac{\partial b(T_0, x)}{\partial x} = \frac{\alpha_1^2 C_{01} e^{-\alpha_1 \frac{x}{v}}}{v \rho_{oc}} \left(T_0 - \frac{n_0 x}{v} \right) > 0$ для любого $x \in [0; L]$.

Это значит, что максимальная удельная загрязненность будет на конце участка, т. е. при $x = L$, а именно

$$b(T_0, L) = b_0 - \left[n_0 \left(1 - e^{-\alpha_1 T_0} \right) + \alpha_1 e^{-\alpha_1 T_0} (1 - n_0) T_0 \right] \frac{C_{01}}{\rho_{oc}}. \quad (16)$$

Второй ход (нисходящее движение) и последующие ходы

После продавливания раствора реагента в первом ходе на всю длину L этот же раствор с той же скоростью продавливается в обратном направлении. Это называем вторым ходом.

Для описания процесса выбираем схему, как указано на рис. 1б. В результате можно использовать те же уравнения (4), (5), как и для первого хода, только изменив начальные и граничные условия (6), (7). Так как согласно (13) при $t \geq T_0$ и любом $x \in [0; L]$ $\tilde{C}(t, x) = C_{01}e^{-\alpha_1 T_0}$, то имеет смысл условия (6), (7) изменить следующим образом:

$$\tilde{C}(0, x) = \tilde{C}(t, 0) = C_{01}e^{-\alpha_1 T_0}, \quad b(0, x) = b_2, \quad (17)$$

где b_2 – определяется по формуле (16).

Так как среднее значение b_c изменится, следует пересчитать для второго цикла α_{2i} . Пересчитанное значение обозначим α_2 . Вышесказанное позволяет нам написать формулу для максимальной удельной загрязненности (которая, напомним, будет иметь место на конце участка, т. е. при $x = L$)

$$b(T_0, L) = b_2 - \left[n_0 \left(1 - e^{-\alpha_2 T_0} \right) + \alpha_2 e^{-\alpha_2 T_0} (1 - n_0) T_0 \right] \frac{C_{01} e^{-\alpha_1 T_0}}{\rho_{oc}}. \quad (18)$$

Рассуждая аналогичным образом, можно получить формулу для максимальной удельной загрязненности после проведения k ходов реагента

$$b(T_0, L) = b_0 - \sum_{m=1}^k \left[n_0 \left(1 - e^{-\alpha_m T_0} \right) + \alpha_m e^{-\alpha_m T_0} (1 - n_0) T_0 \right] J_m, \quad (19)$$

где $J_1 = C_{01}$, остальные J_m определяются рекуррентной формулой

$$J_m = J_{m-1} e^{-\alpha_{m-1} T_0}. \quad (20)$$

Выражение (19) показывает, что с ростом количества ходов уменьшения удельной загрязненности практически не происходит, т. е. необходима замена рабочего раствора на новый.

По полученным формулам была составлена компьютерная программа, позволяющая рассчитать количество циклов работы устройства, продолжительность очистки и степень удаления кольматанта на каждом этапе работы.

Пример

Рассмотрим работу установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров с использованием двух различных реагентов: соляной кислоты и дитионита натрия.

Исходные данные: диаметр фильтра $D_\phi = 273$ мм; диаметр камеры $D_{\text{кам}} = 219$ мм; толщина гравийной обсыпки $\delta = 89$ мм; удельный объем отложений кольматанта $b_0 = 0,1$; начальная пористость среды $n_0 = 0,3$; насыщенность порового пространства осадком $\chi = b_0/n_0 = 0,1/0,3 = 0,33$; плотность кольматанта $\rho_k = 2250$ кг/м³; длина обрабатываемого участка фильтра $L = 0,4$ м.

Кольматант представляет собой многокомпонентную систему, включающую соли кальция, магния, марганца (карбонаты), соединения железа в виде гидроксида, оксида, сульфида, фосфата [12]. Но так как в составе кольматанта преобладают соединения железа, далее для упрощения расчетов будем принимать, что кольматант состоит из $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Масса кольматанта M_k может быть определена по степени насыщенности порового пространства кольматирующими образованиями α в объеме пор гравийной обсыпки $W_{\text{пор}}$ по формуле

$$M_k = \chi \rho_k W_{\text{пор}} = \chi \rho_k \pi (R_r^2 - r_{\text{ф}}^2) L_{\text{ф}} n_0, \quad (21)$$

где ρ_k – плотность твердых частиц скелета осадка, изменяется от 1,7 до 3,1 г/см³; R_r – радиус гравийной обсыпки; $r_{\text{ф}}$ – радиус фильтра; $L_{\text{ф}}$ – длина фильтра; n_0 – начальная пористость гравийной обсыпки; χ – насыщенность порового пространства.

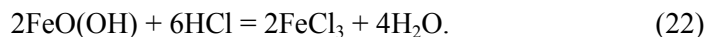
Подставив исходные данные, получим

$$M_k = 0,33 \cdot 2250 \cdot 3,14 \cdot (0,225^2 - 0,136^2) \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 9 \text{ кг.}$$

Регенерация с использованием соляной кислоты

Произведем теоретический расчет затрат соляной кислоты 100%-й концентрации на растворение кольматанта известного химического состава. Введем обозначение $M.B.$ – молекулярный вес.

Реакция растворения железистых соединений с соляной кислотой происходит по уравнению



Согласно (22) и ранее определенному значению M_k , находим требуемое количество соляной кислоты из следующего выражения:

$$m_{\text{HCl}} = \frac{M_k \cdot M.B._{\text{HCl}}}{M.B._{\text{FeO}(\text{OH})}}. \quad (23)$$

Молекулярный вес соединений:

$$M.B._{\text{FeO}(\text{OH})} = 55,8 + 16 \cdot 2 + 1 = 89 \text{ г/моль};$$

$$M.B._{\text{HCl}} = 1 + 35,5 = 36,5 \text{ г/моль};$$

$$M.B._{\text{FeCl}_3} = 55,8 + 35,5 \cdot 3 = 162,3 \text{ г/моль}.$$

Тогда

$$m_{\text{HCl}} = \frac{9 \cdot 0,219}{0,178} = 11,07 \text{ кг.}$$

Исследования [12] показали, что при 20%-й концентрации раствора соляной кислоты происходит наиболее эффективное растворение кольматанта в прифильтровой зоне. Определяем объем 20%-й соляной кислоты HCl

$$V_{\text{HCl}20\%} = \frac{m_{\text{HCl}}}{\rho_{\text{HCl}} C_{20\%}}, \quad (24)$$

где ρ_{HCl} – плотность соляной кислоты; $C_{20\%}$ – массовая концентрация соляной кислоты.

Подставив числовые значения, получим

$$V_{\text{HCl}20\%} = \frac{11,07}{1,098 \cdot 0,2} = 50,5 \text{ дм}^3.$$

Объем раствора соляной кислоты 20%-й концентрации, помещающегося в скважину длиной 0,4 м, $V_{\text{р-ра}} = 31 \text{ дм}^3$.

Из полученных данных видно, что для растворения 9 кг кольматанта, который содержится в гравийной обсыпке скважины длиной 0,4 м, необходимо 11,07 кг соляной кислоты 100%-й концентрации или 50,5 дм³ 20%-й соляной кислоты. Но в скважину с помощью устройства из-за геометрических размеров можно залить только 31 дм³ 20%-й соляной кислоты. Следовательно, будет необходима доливка реагента при работе устройства.

Для расчета по предложенной программе необходимо задать предельную концентрацию FeCl_3 , которая будет в растворе при взаимодействии соляной кислоты 20%-й концентрации и кольматанта.

Согласно (22) и ранее определенному значению $M_{\text{к}}$, находим массу хлорида железа m_{FeCl_3} из следующего выражения:

$$m_{\text{FeCl}_3} = \frac{m_{\text{HCl}} \cdot \text{М.В.}_{\text{FeCl}_3}}{\text{М.В.}_{\text{HCl}}} = \frac{11,07 \cdot 0,3246}{0,219} = 16,4 \text{ кг}. \quad (25)$$

Максимальная концентрация хлорида железа определяется по формуле

$$C_{m\text{FeCl}_3} = \frac{m_{\text{FeCl}_3}}{V_{\text{р-ра}}} = \frac{16,4}{31} = 0,529 \text{ кг/дм}^3. \quad (26)$$

В программу занесены следующие исходные данные:

- начальная пористость среды $n_0 = 0,3$;
 - удельный объем отложений $b_0 = 0,1$;
 - плотность кольматанта $\rho_{\text{к}} = 2250 \text{ кг/м}^3$;
 - длина обрабатываемого участка фильтра $L = 0,4 \text{ м}$;
 - диаметр зерен гравийной загрузки $d_0 = 1 \text{ мм}$;
 - максимальная концентрация хлорида железа в данном объеме реагента $C_{m\text{FeCl}_3} = 529 \text{ кг/м}^3$;
 - скорость движения реагента в закольматированной загрузке $v = 2 \text{ см/с}$.
- Результаты расчетов:
- время прохода реагентом участка длиной 0,4 м $T_0 = 20 \text{ с}$;
 - продолжительность промывки участка длиной 0,4 м $T_{\text{общ}} = 80 \text{ с}$.

Значения удельного объема кольматанта в гравийной обсыпке с использованием соляной кислоты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения удельного объема отложений кольматанта в гравийной обсыпке на каждом цикле регенерации с использованием соляной кислоты

The values of the specific volume of the mudding element deposits in the gravel package at each cycle of regeneration using hydrochloric acid

Первая заливка реагента		Вторая заливка реагента	
Номер цикла	Удельный объем отложений в конце цикла b	Номер цикла	Удельный объем отложений в конце цикла
1	0,014280	1	$\approx 0,01$
2	0,011582		
3	0,011464		

Проверка полученных данных

Первоначально удельный объем отложений составлял $b_0 = 0,1$. После заливки реагента и четырех циклов движения реагента в гравийной закольматированной загрузке удельный объем отложений составил $b = 0,01$.

Масса оставшегося кольматанта рассчитывается по формуле (21) с учетом изменения удельного объема отложений

$$M_{\text{к.ост}} = 0,033 \cdot 2250 \cdot 3,14 \cdot (0,225^2 - 0,136^2) \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 0,89 \text{ кг.}$$

Следовательно, масса удаленного кольматанта $M_{\text{к.у}}$ вычисляется по формуле

$$M_{\text{к.у}} = M_{\text{к}} - M_{\text{к.ост}} = 9 - 0,89 = 8,11 \text{ кг.} \quad (27)$$

После четырех циклов движения в закольматированной загрузке концентрация раствора соляной кислоты с 20 % становится 1,9 %.

Регенерация с использованием дитионита натрия

Произведем теоретический расчет затрат дитионита натрия 100%-й концентрации на растворение кольматанта известного химического состава.

Реакция растворения железистых соединений с дитионитом натрия происходит по уравнению



Согласно (28) и ранее определенному значению $M_{\text{к}}$, находим требуемое количество дитионита натрия из следующего выражения:

$$m_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} = \frac{M_{\text{к}} \cdot M_{\text{B}} \cdot \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4}{M_{\text{B}} \cdot \text{Fe}(\text{OH})_3}. \quad (29)$$

Молекулярный вес соединений:

$$M_{\text{B}} \cdot \text{Fe}(\text{OH})_3 = 55,8 + 16 \cdot 3 + 1 \cdot 3 = 106,8 \text{ г/моль};$$

$$M_{\text{B}} \cdot \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 = 23 \cdot 2 + 32 \cdot 2 + 16 \cdot 4 = 174 \text{ г/моль};$$

$$M_{\text{B}} \cdot \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 = 55,8 \cdot 2 + 32 \cdot 3 + 16 \cdot 12 = 399,6 \text{ г/моль}.$$

Тогда

$$m_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} = \frac{9 \cdot 0,174}{0,2136} = 7,33 \text{ кг.}$$

Установлено, что оптимальным условием растворения железистого кольматанта является концентрация раствора дитионита натрия 6–8 % при температуре не выше 18 °С. Добавка 1 % триполифосфата натрия в раствор позволяет предупредить повторное осаждение гидроксида железа в процессе обработки [12].

Объем 7%-го раствора дитионита натрия, полученный из 7,33 кг дитионита натрия 100%-й концентрации, будет равен 104,7 л.

Из полученных данных видно, что для растворения 9 кг кольматанта, который содержится в гравийной обсыпке скважины длиной 0,4 м, так же как и в случае с соляной кислотой, необходима доливка реагента при работе устройства.

Для расчета по предложенной программе нужно задать предельную концентрацию $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, которая будет в растворе при взаимодействии дитионита натрия 7%-й концентрации и кольматанта.

Согласно (28) и ранее определенному значению M_k , находим массу сульфата железа

$$m_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = \frac{m_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} \cdot M_{\text{B} \cdot \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3}}{M_{\text{B} \cdot \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4}} = \frac{7,33 \cdot 0,3996}{0,174} = 16,834 \text{ кг.} \quad (30)$$

Максимальная концентрация сульфата железа составит

$$C_{m\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = \frac{m_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3}}{V_{\text{р-ра}}} = \frac{16,834}{31} = 0,543 \text{ кг/дм}^3. \quad (31)$$

В программу вносим следующие исходные данные:

- начальная пористость среды $n_0 = 0,3$;
- удельный объем отложений $b_0 = 0,1$;
- плотность кольматанта $\rho_k = 2250 \text{ кг/м}^3$;
- длина обрабатываемого участка фильтра $L = 0,4 \text{ м}$;
- диаметр зерен гравийной загрузки $d_0 = 1 \text{ мм}$;
- максимальная концентрация хлорида железа в данном объеме реагента $C_{m\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = 543 \text{ кг/м}^3$;
- скорость движения реагента в закольматированной загрузке $v = 2 \text{ см/с}$.

Результаты расчетов:

- время прохода реагентом участка длиной 0,4 м $T_0 = 20 \text{ с}$;
- продолжительность промывки участка длиной 0,4 м $T_{\text{общ}} = 80 \text{ с}$.

Значения удельного объема кольматанта в гравийной обсыпке с использованием дитионита натрия представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения удельного объема отложений кольматанта в гравийной обсыпке на каждом цикле регенерации с использованием дитионита натрия
The values of the specific volume of the mudding element deposits in the gravel package at each cycle of regeneration using sodium dithionite

Первая заливка реагента		Вторая заливка реагента	
Номер цикла	Удельный объем отложений в конце цикла b	Номер цикла	Удельный объем отложений в конце цикла
1	0,012011	1	$\approx 0,0091$
2	0,009239		
3	0,009116		

Проверка полученных данных

Первоначально удельный объем отложений составлял $b_0 = 0,1$. После заливки реагента и четырех циклов движения реагента в гравийной закольматированной загрузке удельный объем отложений составил $b = 0,0091$.

Масса оставшегося кольматанта рассчитывается по формуле (21) с учетом изменения удельного объема отложений

$$M_{\text{к.ост}} = 0,03 \cdot 2250 \cdot 3,14 \cdot (0,225^2 - 0,136^2) \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 0,817 \text{ кг.}$$

Следовательно, масса удаленного кольматанта вычисляется по формуле

$$M_{\text{к.у}} = M_{\text{к}} - M_{\text{к.ост}} = 9 - 0,817 = 8,183 \text{ кг.} \quad (32)$$

Концентрация 7%-го раствора дитионита натрия после четырех циклов движения в закольматированной загрузке становится 0,63 %.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета продолжительности работы установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров, по истечении которой удельный объем кольматирующих отложений в гравийной обсыпке будет снижен до заданного уровня.

2. Для описания процесса растворения отложений способом реверсивно-реагентной регенерации скважин использована система уравнений: объединенного уравнения движения и сохранения массы и обобщенного уравнения кинетики. Путем интегрирования уравнения кинетики выведена аналитическая зависимость для расчета продолжительности регенерации слоя гравийной обсыпки. Полученная формула позволяет рассчитать время, по истечении которого удельный объем кольматирующих отложений в гравийной обсыпке будет снижен до заданного уровня. Рассмотрен пример расчета продолжительности реагентной обработки участка фильтра при использовании соляной кислоты и дитионита натрия в качестве реагентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Houben, G. Regenerierung und Sanierung von Brunnen / G. Houben, C. Treskatis. Munchen: Oldenbourgindustriever, 2003. 280 p.
2. Brunnenregenerierung mit dem WellReg Verfahren [Electronic resource] / GmbH "Aquaplust Brunnensanierung". 2007. Mode of access: <http://www.brunnenservice.de/dienst/reg.html>. Date of access: 01.06.2007.
3. Тесля, В. Г. Технология циркуляционной регенерации скважин / В. Г. Тесля // Повышение эффективности работы водозаборов из поверхностных и подземных источников: сб. науч. тр. МДНТП имени Ф. Э. Дзержинского. М., 1985. Вып. 74. С. 114–121.

4. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. 3-е, перераб. и доп. изд. М.: Недра, 1985. 345 с.
5. Аксельруд, Г. А. Растворение твердых веществ / Г. А. Аксельруд, А. Д. Молчанов. М.: Химия, 1977. 272 с.
6. Аксельруд, Г. А. Экстрагирование. Система твердое тело – жидкость / Г. А. Аксельруд, В. М. Лысянский. Л.: Химия, 1974. 256 с.
7. Ивашечкин, В. В. Моделирование процесса реагентной регенерации скважин, оборудованных затрубными системами промывки / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко, В. В. Веремениук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 6. С. 80–87.
8. Иванова, И. Е. Установка для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин / И. Е. Иванова, В. В. Ивашечкин // Мелиорация. 2016. Т. 77, № 3. С. 26–31.
9. Алексеев, В. С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах / В. С. Алексеев, Г. М. Коммунар, Б. С. Шержуков // Итоги науки и техники. Гидрогеология и инженерная геология. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 11: Массоперенос в водонасыщенных горных породах. 144 с.
10. Веригин, Н. Н. О кинетике растворения солей при фильтрации воды в грунтах / Н. Н. Веригин // Растворение и выщелачивание горных пород: труды Первого совещания по вопросам выщелачивания водорастворимых горных пород. М.: Госстройиздат, 1957. С. 84–113.
11. Минц, Д. М. Гидравлика зернистых материалов / Д. М. Минц, С. А. Шуберт. М.: Изд-во М-ва коммуна. хозяйства РСФСР, 1955. 111 с.
12. Алексеев, В. С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В. С. Алексеев, В. Т. Гребенников. М.: Агропромиздат, 1987. 239 с.

Поступила 22.06.2017 Подписана в печать 25.08.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Houben G., Treskatis C. (2003) *Regenerierung und Sanierung von Brunnen*. Munchen, Oldenbourgindustriever. 280 (in German).
2. Brunnenregenerierung mit dem WellReg Verfahren. *Aquaplus Brunnensanierung*. 2007. Accessed: <http://www.brunnenservice.de/dienst/reg.html>. (Accessed: 1 Yune 2007) (in German).
3. Teslya V. G. (1985) The Technology of Recirculating of Wells Regeneration. *Sb. Nauch. Tr. MDNTP imeni F. Je. Dzerzhinskogo "Povyshenie Jeffektivnosti Raboty Vodozaborov iz Poverhnostnyh i Podzemnyh Istochnikov"* [Collected Works of the Moscow House of Scientific-and-Technical Publicizing named after F. E. Dzerzhinsky "Improving the Efficiency of Water Intakes from Surface and Underground Sources"]. Moscow, 74, 114–121 (in Russian).
4. Gavrilko V. M., Alekseev V. S. (1985) *Filters for Drilling Wells*. 3rd ed. Moscow, Nedra Publ., 345 (in Russian).
5. Akselrud G. A., Molchanov A. D. (1977) *Dissolution of Solid Substances*. Moscow, Khimiya Publ. 272 (in Russian).
6. Akselrud G. A., Lysyanskii V. M. (1974) Extraction. *The Solid – Liquid System*. Leningrad, Khimiya Publ. 256 (in Russian).
7. Ivashechkin V. V., Avtushko P. A., Veremenyuk V. V. (2013) Modeling the Process of Chemical Regeneration of Wells Equipped with Annular Wash Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 80–87 (in Russian).
8. Ivanova I. Ye., Ivashechkin V. V. (2016) Installation for Reverse-Chemical Regeneration of Water Wells. *Melioratsiya* [Land Reclamation], 77 (3), 26–31 (in Russian).
9. Alekseev V. S., Kommunar G. M., Sherzhukov B. S. (1989) Mass Transfer in Water-Saturated Rocks. *Itoги Nauki i Tekhniki. Gidrogeologiya i Inzhenernaya Geologiya. T. 11: Massopere-nos v Vodonasyshchennykh Gornyykh Porodakh* [The Summaries of Science and Technology. Hydrogeology and Engineering Geology. Vol. 11. Mass Transfer in Water-Saturated Rocks]. Moscow, VINITI. 144 (in Russian).
10. Verigin N. N. (1957) On Kinetics of Dissolution of Salts in Water Filtration into Soils. *Dissolution and Leaching of Rocks. Proceedings of the First Meeting on Leaching of Water-Soluble Rocks*. Moscow, Gosstroizdat Publ., 84–113 (in Russian).
11. Mints D. M., Shubert S. A. (1955) *Hydraulics of Granular Materials*. Moscow, Ministry of Utilities of RSFSR. 111 (in Russian).
12. Alekseev V. S., Grebennikov V. T. (1987) *Restoring the Output of Water Wells*. Moscow, Agropromizdat Publ. 239 (in Russian).

Received: 22 June 2017

Accepted: 25 August 2017

Published online: 29 January 2018