

Учредитель

Министерство образования Республики Беларусь

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю., Новаш И. В. Формирование ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок	191
Жежеленко И. В., Кривонос В. Е., Василенко С. В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя	202
Pokorny J., Marcon P., Kriz T., Janousek J. A Detection System with Spider Web Coil-Based Wireless Charging and an Active Battery Management System (Покорный Й., Маркон П., Криз Т., Яноусек Й. Система обнаружения с беспроводной зарядкой на основе катушки с крестовидной перемычкой и активной системой управления аккумулятором)	219
Потащич Я. В. Исследование возникновения резонанса при воздействии динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок	228
Счастный В. П., Жуковский А. И. Взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий	239

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. Simulation of Photovoltaic Thermoelectric Battery Characteristics (Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А., Кулешов В. К. Моделирование характеристик фототермоэлектрической батареи)	250
Романюк В. Н., Нияковский А. М. Научно-методические основы эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках. Часть 1	259

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Ивашечкин В. В., Крицкая В. И., Ануфриев В. Н., Аврутин О. А. Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования	275
--	-----

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

- В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),*
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
К. В. ДОБРЕГО (Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),
П. В. ЖУКОВСКИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
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. ПИСЬМЕННИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
В. Ю. РУМЯНЦЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
В. А. СЕДНИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
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)

Ведущий стилистический редактор В. Н. Гурьянчик

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 28 февраля 2019 г.
Регистрационный номер 1257**

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

Подписано к печати 31.05.2021. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2021. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.
Тел.: +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, 2021

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 64, No 3
2021

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Ministry of Education of the Republic of Belarus

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., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V.** Formation of Orthogonal Components of Input Currents in Microprocessor Protections of Electrical Equipment 191
- Zhezhelenko I. V., Kryvonosov V. E., Vasilenko S. V.** Criteria for Detecting Turn-To-Turn Short Circuit in Stator Windings Using Vector Analysis of Electric Motor Phase Currents 202
- Pokorny J., Marcon P., Kriz T., Janousek J.** A Detection System with Spider Web Coil-Based Wireless Charging and an Active Battery Management System 219
- Potachits Y. V.** A Study of the Occurrence of Resonance under the Influence of Dynamic Forces on the Structural Elements of Electrical Installations 228
- Schasny V. P., Zhukouski A. I.** On the Mutual Influence of Voltage Control Modes and the Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises 239

HEAT POWER ENGINEERING

- Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K.** Simulation of Photo-voltaic Thermoelectric Battery Characteristics 250
- Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M.** Scientific and Methodological Bases of Exergetic Analysis of the Processes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat Technology Installations. Part 1 259

HYDRAULIC POWER ENGINEERING

- Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I., Anufriev V. N., Avrutin O. A.** Methodology for Analyzing the Actual Technical Condition of Downhole Pumping Equipment 275

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- W. T. WÓJCIK (*Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland*),
V. V. GALAKTIONOV (*Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation*),
M. DADO (*Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic*),
K. V. DOBREGO (*Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, 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*),
V. V. IVASHECHKIN (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
A. S. KALINICHENKO (*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*),
A. I. KIRILLOV (*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation*),
A. KONNOV (*Lund University, Sweden*),
K. MAHKAMOV (*Northumbria University, United Kingdom*),
A. A. MIKHALEVICH (*The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*),
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*),
V. Yu. RUMIANTSEV (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
A.-S. S. SAUHATAS (*Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia*),
V. S. SEVERYANIN (*Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus*),
V. A. SEDNIN (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
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*),
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*)

Leading Style Editor V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2019, February, 28th
Reg. No 1257**

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

Passed for printing 31.05.2021. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,25.
An edition of 100 copies. Date of publishing . 2021. 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, 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201>

УДК 621.316.925

Формирование ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок

Ф. А. Романюк¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾, И. В. Новаш¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Используемые в микропроцессорных защитах электроустановок методы формирования ортогональных составляющих входных токов обеспечивают достоверное их выделение после изменения режима по истечении одного или нескольких периодов основной частоты. Это обусловлено инерционностью функциональных элементов, в частности цифровых частотных фильтров, а также насыщением стали магнитопроводов трансформаторов тока. Для повышения быстродействия выделения ортогональных составляющих входных токов предложено формировать их как эквивалентные по значениям косинусной и синусной составляющих, полученных с использованием цифровых фильтров Фурье, путем умножения на результирующий коэффициент. Разработанная методика определения указанного коэффициента обеспечивает компенсацию запаздывания, обусловленного инерционностью цифровых фильтров, а также насыщением стали магнитопроводов трансформаторов тока. Предложенный метод формирования ортогональных составляющих отличается высокой эффективностью в режимах сильного насыщения магнитопровода при сложном входном воздействии при наличии в нем аperiodической составляющей с большой постоянной времени затухания. Оценка эффективности функционирования разработанного метода выполнялась с помощью комплексной цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink. В результате исследований установлено, что при отсутствии насыщения магнитопровода трансформаторов тока, а также при незначительной и средней его степени разработанный метод формирования эквивалентных ортогональных составляющих входных токов обладает динамическими свойствами, близкими к характеристикам ранее предложенных. При сильном насыщении магнитопровода трансформаторов тока обеспечивается повышение быстродействия получения достоверных значений указанных составляющих в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: ортогональные составляющие входных токов, микропроцессорная защита, цифровые фильтры Фурье, насыщение стали магнитопровода трансформаторов тока, корректирующий коэффициент, цифровая модель, тестовое воздействие, MatLab-Simulink, результаты исследования, быстродействующий метод

Для цитирования: Формирование ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201>

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

Formation of Orthogonal Components of Input Currents in Microprocessor Protections of Electrical Equipment

F. A. Romaniuk¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, I. V. Novash¹⁾

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

Abstract. The methods used in the microprocessor protection of electrical equipment for forming orthogonal components of input currents ensure their reliable isolation after changing the mode followed by one or more periods of the fundamental frequency. This is due to the inertia of the functional elements, in particular, digital frequency filters, as well as the saturation of the steel magnetic cores of current transformers. To increase the speed of the selection of orthogonal components of the input currents, it is proposed to form them as equivalent ones in terms of the cosine and sine components obtained using digital Fourier filters by multiplying by the resulting coefficient. The method that has been developed for determining the specified coefficient provides compensation for the delay caused by the inertia of digital filters, as well as the saturation of the steel of magnetic cores of current transformers. The proposed method of forming orthogonal components is highly effective in the modes of strong saturation of the magnetic core with a complex input action in the presence of an aperiodic component with a large damping time constant. The evaluation of the efficiency of the proposed method was performed using a complex digital model implemented in the dynamic modeling environment MatLab-Simulink. As a result of the performed studies, it was found that in the absence of saturation of the magnetic core of current transformers, as well as in the presence of a small and medium degree of saturation, the proposed method for forming equivalent orthogonal components of input currents has dynamic properties close to the ones of those that had been previously proposed. With a strong saturation of the magnetic core of current transformers, the speed of obtaining reliable values of these components is increased by 1.5–2 times.

Keywords: orthogonal components of input currents, microprocessor protection, digital Fourier filters, saturation of the steel of the magnetic core of current transformers, correction factor, digital model, test effect, MatLab-Simulink, research results, fast-acting method

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Formation of Orthogonal Components of Input Currents in Microprocessor Protections of Electrical Equipment. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201> (in Russian)

Введение

Традиционно применяемые в микропроцессорных защитах электроустановок методы выделения ортогональных составляющих (ОС) входных токов обеспечивают возможность достоверных измерений после изменения режима лишь по истечении времени, равного одному или нескольким периодам основной частоты [1]. Это обусловлено в основном двумя главными причинами.

Первая из них связана с инерционностью функциональных элементов, с помощью которых реализуется формирование ОС, в частности частотных цифровых фильтров (ЦФ) [2]. Например, классический ЦФ Фурье позволяет получить достоверные результаты лишь через время одного периода основной частоты.

Вторая причина обусловлена появлением при повреждениях в токах апериодических и гармонических составляющих, в результате чего происходит насыщение стали магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ) [3–5]. При этом искажаются формы входных токов и значительно уменьшаются их величины, а вносимое замедление в получение истинных значений ОС измеряется несколькими периодами основной частоты.

В результате влияния названных выше причин затягивается время получения достоверных значений ОС, которое в основном и определяет быстрдействие цифровых измерительных органов защиты.

Для повышения быстрдействия выделения ОС входных токов в [6] предложено формировать эквивалентные ортогональные составляющие, которые, в сущности, можно рассматривать как прогнозные. Эквивалентные косинусная i_{eqcn} и синусная i_{eqsn} ОС являются функцией так называемого корректирующего коэффициента k_m и одноименных ОС основной частоты входного тока i_{cn} , i_{sn} , выделяемых с помощью ЦФ Фурье:

$$\begin{aligned} i_{eqcn} &= k_m i_{cn}; \\ i_{eqsn} &= k_m i_{sn}. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом текущие значения k_m должны определяться таким образом, чтобы осуществлялась компенсация запаздывания выделения ОС, обусловленного как инерционностью ЦФ, так и насыщением стали магнитопровода ТТ.

Основная часть

Принимая во внимание изложенное выше, корректирующий коэффициент k_m можно представить в виде произведения двух аналогичных коэффициентов k_{Zn} и k_{Nn} , первый из которых обеспечивает компенсацию запаздывания вследствие инерционности ЦФ, а второй – насыщения стали магнитопровода ТТ:

$$k_m = k_{Zn} k_{Nn}. \quad (2)$$

Выражение для текущих значений корректирующего коэффициента k_{Zn} , полученное по изложенной в [7] методике, имеет вид

$$k_{Zn} = \frac{I_{вхn}^2}{I_{1n}^2}, \quad (3)$$

где $I_{вхn}$ – текущее действующее значение входного тока; I_{1n} – то же основной гармоники входного тока.

Признаком насыщения магнитопровода ТТ считается наличие в полном вторичном токе, который является входным, кроме основной, высших гармоник [8, 9]. При возрастании степени указанного насыщения происходит увеличение состава высших гармоник во входном токе, а текущее действующее значение основной гармоники I_{1n} уменьшается. Вследствие этого корректирующий коэффициент k_{Zn} , определяемый по (3), увеличивается, благодаря чему достигается частичная компенсация запаздывания, обусловленного насыщением стали магнитопровода ТТ.

В результате выполненных исследований установлено, что корректирующий коэффициент k_{Zn} обеспечивает компенсацию запаздывания, вносимого как инерционностью ЦФ, так и насыщением стали магнитопровода ТТ при незначительной и средней его степени. При глубокой степени указанного насыщения, когда в первичном токе присутствует значительная аperiodическая составляющая с большой постоянной времени затухания, необходим отдельный дополнительный его учет с помощью корректирующего коэффициента k_{Nn} . В основе получения выражения для k_{Nn} лежат следующие соображения.

Для фиксации режима насыщения магнитопровода ТТ можно пользоваться коэффициентом гармонических искажений THD_n , текущие значения которого определяются уровнем содержания высших гармоник во входном токе. При неучете постоянной составляющей в указанном токе, что вполне допустимо, значения THD_n рассчитываются по выражению

$$THD_n = \sqrt{1 - \frac{I_{1n}^2}{I_{вхн}^2}}. \quad (4)$$

Степень искажения входного тока вследствие насыщения магнитопровода ТТ оценивается коэффициентом искажения KI_n , который является функцией THD_n .

В режимах глубокого насыщения магнитопровода ТТ при наличии в первичном токе аperiodической составляющей с большой постоянной времени затухания значения KI_n должны существенно возрасти в соответствии с увеличением THD_n , достигая наибольшей величины при $THD_n = 1$. При медленном выходе из указанных режимов из-за большой постоянной времени затухания необходимо обеспечить плавное снижение KI_n до значения, равного нулю, при полном затухании аperiodической составляющей.

Простая нелинейная зависимость $KI_n = f(THD_n)$, позволяющая выполнить указанные условия, имеет вид

$$KI_n = mTHD_n^2 = m \left(1 - \frac{I_{1n}^2}{I_{вхн}^2} \right), \quad (5)$$

где m – постоянный коэффициент, посредством которого задается диапазон изменения KI_n .

В установившихся режимах при отсутствии насыщения, когда $THD_n = 0$, коэффициент $KI_n = 0$, а в случае глубокого насыщения при $THD_n \rightarrow 1$ значение $KI_n \rightarrow m$.

Корректирующий коэффициент k_{Nn} должен возрастать с увеличением KI_n и плавно снижаться по мере затухания переходного процесса, принимая в установившемся режиме, когда $KI_n = 0$, значение, равное 1. Принимая во внимание изложенное выше, получим выражение для текущих значений корректирующего коэффициента k_{Nn}

$$k_{Nn} = KI_n + 1 = m \left(1 - \frac{I_{1n}^2}{I_{вхн}^2} \right) + 1. \quad (6)$$

После подстановки в (2) значений k_{Zn} и k_{Nn} соответственно из (3) и (6) формула для расчета текущих значений результирующего коэффициента k_m примет вид

$$k_m = (m+1) \frac{I_{\text{вх}n}^2}{I_{1n}^2} - m. \quad (7)$$

Текущее действующее значение входного тока $I_{\text{вх}n}$ вычисляется по выражению

$$I_{\text{вх}n} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_{\text{вх}n}^2}, \quad (8)$$

где N – число выборок за период основной частоты, которому соответствует окно наблюдения; $n = 1 \dots N$ – номер выборки входного тока в окне наблюдения; $i_{\text{вх}n}$ – выборки входного тока.

Определение текущего действующего значения основной гармоники входного тока I_{1n} осуществляется по косинусной i_{cn} и синусной i_{sn} ОС путем реализации формулы

$$I_{1n} = \sqrt{\frac{i_{cn}^2 + i_{sn}^2}{2}}. \quad (9)$$

При этом формирование ОС основной гармоники входного тока производится с помощью ЦФ Фурье по выражениям:

$$\begin{aligned} i_{cn} &= \sum_{n=1}^N a_{cn} i_{\text{вх}n}; \\ i_{sn} &= \sum_{n=1}^N a_{sn} i_{\text{вх}n}, \end{aligned} \quad (10)$$

где a_{cn} , a_{sn} – коэффициент соответственно косинусного и синусного ЦФ Фурье.

Входные токи, подводимые к микропроцессорной защите, могут изменяться в зависимости от имеющего место режима работы электроустановки. В нормальном режиме и в установившемся режиме короткого замыкания (КЗ) указанные токи остаются практически неизменными, возрастают при возникновении КЗ и спадают после его отключения. Согласно этому на кривой изменения действующего значения входного тока $I_{\text{вх}}(t)$ всегда можно выделить три характерных участка с присвоением признаку c численного значения: $c = 1$ – ток возрастает; $c = 0$ – ток не изменяется; $c = -1$ – ток снижается.

Определение признака c осуществляется по двум смежным выборкам $I_{\text{вх}}(t)$ с использованием методики, представленной в [7].

Эквивалентные косинусная i_{eqcn} и синусная i_{eqsn} ОС в пределах участка возрастающего входного тока $I_{\text{вх}}(t)$, где $c = 1$, вычисляются согласно (1) с использованием текущих значений k_m , рассчитываемых по (7). На участке неизменного $I_{\text{вх}}(t)$, когда $c = 0$, выполняется то же самое, но при $k_m = 1$. При этом значения эквивалентных ОС полностью совпадают со значениями ОС, сформированных ЦФ Фурье. Для участка снижающегося $I_{\text{вх}}(t)$,

где $c = -1$, характерно наличие в токе переходного режима, помимо составляющей основной гармоники, постоянной составляющей и высших гармоник, амплитуды которых вначале возрастают, а затем снижаются до нулевых значений при наступлении установившегося режима. При этом текущее действующее значение основной гармоники постепенно уменьшается до достижения соответствующей величины после завершения переходного процесса.

Это позволяет на основании приведенных в [7] результатов исследований использовать для формирования эквивалентных ОС на участке $I_{вх}(t)$ при $c = -1$ корректирующий коэффициент, вычисляемый как отношение квадратов текущих действующих значений основной гармоники входного тока I_{1n} и его полной величины $I_{вхl}$:

$$k_m = \frac{I_{1n}^2}{I_{вхl}^2}. \quad (11)$$

С учетом изложенного выше общее выражение для определения результирующего корректирующего коэффициента для произвольной выборки n , расположенной на любом из участков кривой $I_{вх}(t)$, будет иметь вид

$$k_m = 0,5(|c| + c) \left[(m + 1) \frac{I_{вхl}^2}{I_{1n}^2} - m \right] + 0,5(|c| - c) \frac{I_{1n}^2}{I_{вхl}^2} - |c| + 1. \quad (12)$$

Следует отметить, что с увеличением постоянного коэффициента m возрастает быстродействие формирования эквивалентных ОС. Вместе с тем при превышении m некоторой величины на переходной характеристике эквивалентного тока I_{eqn} появляются выбросы. Оптимальным является значение m , при котором обеспечивается высокое быстродействие получения эквивалентных ОС при гладкой переходной характеристике I_{eqn} с отсутствием на ней выбросов.

В результате проведенных методом вычислительного эксперимента исследований установлено, что оптимальная величина коэффициента m находится в диапазоне 0,3–0,4.

Моделирование

Оценка работоспособности и эффективности функционирования предлагаемого метода формирования ОС входных токов в микропроцессорных защитах выполнялась с помощью комплексной цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink.

В структуре указанной модели содержатся энергосистема, трехфазная группа ТТ, нагрузка, блок КЗ, а также модели элементов, обеспечивающих реализацию описанного выше метода получения ОС входных токов [10]. Моделирование функциональных блоков и элементов цифровой структуры выполнено с использованием методов и правил, изложенных в [11–14].

Результаты исследования

Исследование работоспособности и эффективности предложенного метода формирования ОС входных токов в микропроцессорных защитах производилось при различных тестовых воздействиях.

В результате проведенных исследований установлено, что текущие значения результирующего корректирующего коэффициента k_m , определяемые по (12), в переходных режимах могут значительно возрасти. Это является следствием влияния случайных факторов, а также скачкообразного изменения входного тока, когда в первые моменты коммутации в ЦФ происходит замещение доаварийных выборок аварийными. В результате этого на переходной характеристике эквивалентного тока I_{eqn} могут появляться выбросы. Для их исключения и получения гладкой переходной характеристики указанного тока необходимо ограничить текущие значения k_m максимальным уровнем k_{rmax} . Аналитическое определение k_{rmax} является относительно сложной задачей, решение которой существенно упрощается с использованием результатов вычислительного эксперимента.

На рис. 1 приведены результаты расчетов при гармоническом входном воздействии (кривая 1) изменения относительного действующего значения эквивалентного тока (кривая 2) в различных режимах работы электроустановки: нормальный режим – возникновение КЗ – установившийся режим КЗ – отключение КЗ – бестоковая пауза – успешное повторное включение.

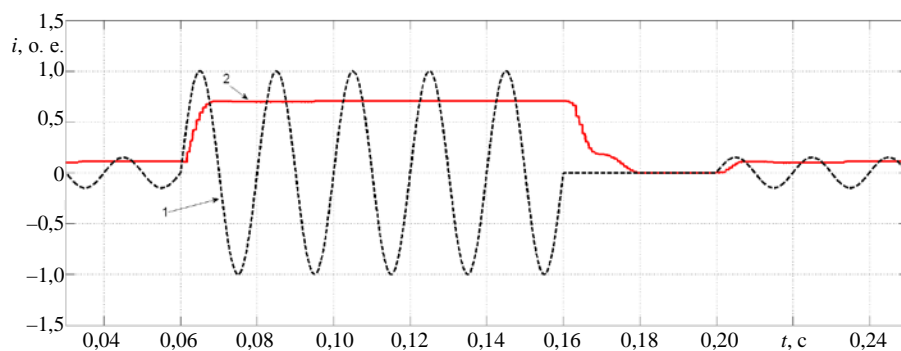


Рис. 1. Изменение относительного действующего значения эквивалентного тока в различных режимах гармонического входного воздействия

Fig. 1. Change in the relative effective value of the equivalent current in different modes of harmonic input action

На рис. 2 представлено согласованное по времени с рис. 1 изменение текущих значений результирующего корректирующего коэффициента. Как видно из указанного рисунка, в нормальном режиме и режиме установившегося КЗ, а также после успешного повторного включения $k_m = 1$. Любое скачкообразное изменение входного воздействия с нулевого уровня или до него сопровождается возрастанием коэффициента k_m , что подтверждает необходимость его ограничения. В переходном режиме КЗ, возникающего с уровня нормального режима в момент времени $t = 0,06$ с, наибольшая величина k_m достигает значения порядка 2. Поэтому с учетом возможного влияния различных факторов можно принять $k_{rmax} = 2,5$.

При отсутствии насыщения магнитопровода ТТ, а также при незначительной и средней его степени предложенный метод формирования ОС входных токов обладает такими же быстродействием и переходной характеристикой I_{eqn} , как и реализованный ранее, описанный в [7]. Это подтверждается приведенными на рис. 3 результатами исследований. При сложном вход-

ном воздействии (кривая 1) и несущественном насыщении магнитопровода ТТ переходные характеристики I_{eqn} предложенного метода формирования ОС (кривая 2) и реализованного ранее (кривая 3) практически совпадают.

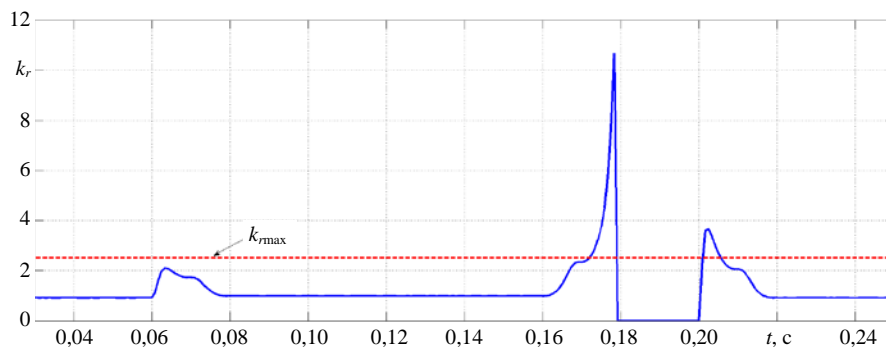


Рис. 2. Изменение значений результирующего корректирующего коэффициента
 Fig. 2. Changing the values of the resulting correction factor

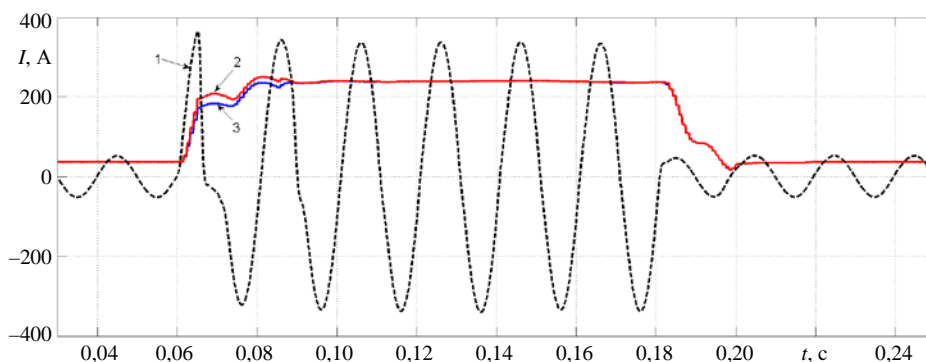


Рис. 3. Изменение действующего значения эквивалентного тока при несущественном насыщении магнитопровода трансформаторов тока
 Fig. 3. Change in the effective value of the equivalent current in conditions of insignificant saturation of the magnetic core of current transformers

Более высокая эффективность разработанного метода формирования ОС в сравнении с описанным в [7] имеет место в режимах сильного насыщения магнитопровода ТТ. Как следует из представленных на рис. 4 результатов исследований, при сложном входном воздействии (кривая 1) и сильном насыщении магнитопровода ТТ переходная характеристика эквивалентного тока предложенного метода (кривая 2) располагается выше (при более быстром достижении установившегося значения) аналогичной характеристики реализованного ранее метода (кривая 3). В результате обеспечивается повышение быстродействия формирования эквивалентных ОС в 1,5–2 раза.

Как видно из рис. 3, 4, при спаде входного тока предложенный и известный методы формирования ОС функционируют идентично.

В качестве параметра для относительной оценки динамических свойств различных методов формирования ОС можно использовать изменение отно-

шения действующих значений эквивалентных токов, полученных с помощью сравниваемых методов. При значениях указанного параметра, близких к единице, методы являются практически идентичными, и чем больше они отличаются от единицы, тем более высокими динамическими свойствами обладает один из них для условий конкретного режима входного тока.

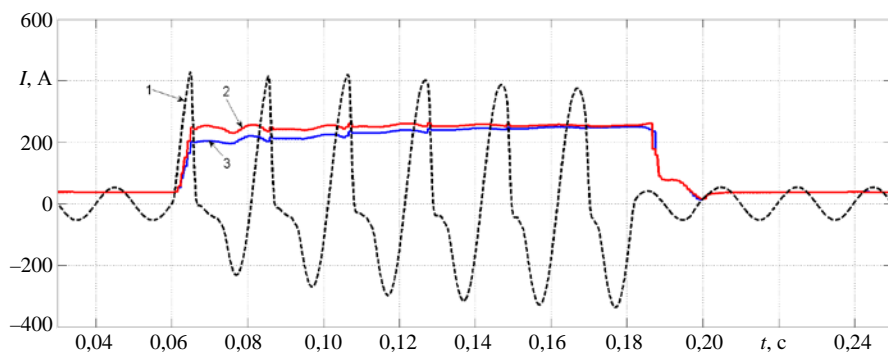


Рис. 4. Изменение действующего значения эквивалентного тока при сильном насыщении магнитопровода трансформаторов тока

Fig. 4. Change in the effective value of the equivalent current at high saturation of the magnetic core of current transformers

На рис. 5 приведено согласованное по времени с рис. 3, 4 изменение отношения действующих значений эквивалентных токов k , полученных с помощью предложенного и известного методов, при сильном (кривая 1) и слабом (кривая 2) насыщения магнитопровода ТТ. Анализ представленных зависимостей свидетельствует о более высоких динамических свойствах разработанного метода формирования ОС входных токов в сравнении с предложенным в [7] для условий глубокого насыщения магнитопровода ТТ и о практическом совпадении указанных свойств при его малой степени либо отсутствии.

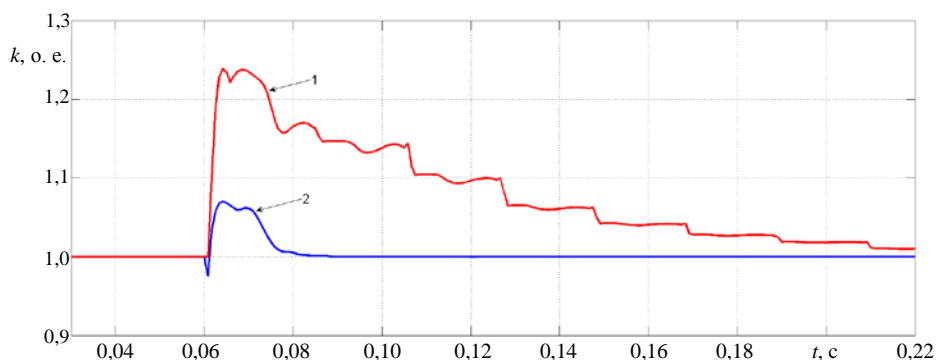


Рис. 5. Отношение действующих значений эквивалентных токов, полученных предложенным и известным методами, при сильном (кривая 1) и слабом (кривая 2) насыщения магнитопровода трансформаторов тока

Fig. 5. The ratio of the effective values of equivalent currents obtained by the proposed and known methods for strong (curve 1) and weak (curve 2) saturation of the magnetic core of current transformers

Дальнейшее повышение быстродействия формирования ОС входных токов может быть осуществлено за счет реализации принципа адаптивности путем соответствующего текущего изменения входящего в (12) коэффициента m .

ВЫВОДЫ

1. Предложенный быстродействующий метод формирования ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок отличается высокой эффективностью в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформаторов тока.

2. Разработанные положения могут составить основу для создания адаптивных методов формирования ОС входных величин в микропроцессорных защитах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>.
3. Cosse, R. E. CT Saturation Calculations: are they Applicable in the Modern World? Part I: The Question / R. E. Cosse, D. G. Dunn, R. M. Spiewak // IEEE Transactions on Industry Applications. 2005. Vol. 43, No 2. P. 444–452. <https://doi.org/10.1109/tia.2006.890023>.
4. Benmouyal, G. The Impact of High Fault Current and CT Rating Limits on Overcurrent Protection / G. Benmouyal, S. E. Zocholl // Proceedings of the 29th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA. 2002.
5. Instantaneous Overcurrent Element for Heavily Saturated Current in a Power System: pat. US US6757146 B2 / G. Benmouyal, S. E. Zocholl, A. Guzman-Casillas. Publ. date 29.06.2004.
6. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.
7. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
8. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем. Релейная защита сетей / А. М. Федосеев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
9. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.
10. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339>.
11. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5 [Electronic resource]. The MathWorks, 2011. Mode of access: <https://all-guidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
12. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.

13. Дэбни, Дж. Б. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Б. Дэбни, Т. Л. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
14. Цифровой измерительный орган для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493>.

Поступила 16.02.2021 Подписана в печать 20.04.2021 Опубликовано онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Sheyerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417> (in Russian).
3. Cosse R. E., Dunn D. G., Spiewak R. M. (2005) CT Saturation Calculations: are they Applicable in the Modern World? Part I: The Question. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43 (2), 444–452. <https://doi.org/10.1109/tia.2006.890023>.
4. Benmouyal G., Zocholl S. E. (2002) The Impact of High Fault Current and CT Rating Limits on Overcurrent Protection. *Proceedings of the 29th Annual Western Protective Relay Conference*. Spokane, WA.
5. Benmouyal G., Zocholl S. E., Guzman-Casillas A. (2004) *Instantaneous Overcurrent Element for Heavily Saturated Current in a Power System*. Pat. US US6757146 B2.
6. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412> (in Russian).
7. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Enhancement of the Orthogonal Components Forming Algorithm for the Microprocessor-Based Relay Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108> (in Russian).
8. Fedoseyev A. M. (1992) *Relay Protection of Electric Power Grids. Relay Protection of Electric Power Networks*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 528 (in Russian).
9. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. (1998) *Relay Protection of Electric Energy Grids*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 800 (in Russian).
10. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Kachenya V. S. (2020) Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Based Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339> (in Russian).
11. *SimPowerSystems. User's Guide. Version 5*. The MathWorks, 2011. Available at: <https://allguidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
12. Chernykh I. V. (2011) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press Publ.; Saint-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
13. Dabney J. B., Harman T. L. (2003) *Simulink 4. Secret of Skills*. Moscow, BINOM Publ. 403 (in Russian).
14. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2018) Digital Current Measurement Element for Operation During Current Transformer Severe Saturation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493> (in Russian).

Received: 16 February 2021

Accepted: 20 April 2021

Published online: 31 May 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218>

УДК 621.313.33

Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя

И. В. Жежеленко¹⁾, В. Е. Кривоносов¹⁾, С. В. Василенко¹⁾

¹⁾Азовский морской институт Национального университета «Одесская морская академия»
(Мариуполь, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В электротехнических комплексах промышленных предприятий, морских портов, судов более 80 % оборудования составляют асинхронные двигатели. В ряде случаев они работают с резко переменной нагрузкой, в условиях агрессивной среды, при этом получают питание от сети с отклонениями показателей качества электроэнергии от нормативных, что приводит к высокой повреждаемости. Около 40 % случаев повреждения изоляции обмоток асинхронных двигателей составляют витковые замыкания. Несвоевременное выявление начального момента появления дефектов в асинхронных двигателях или нарушения режимов работы питающей сети и токовых цепей приводит к аварийным ситуациям электротехнического комплекса, простоя оборудования и ущербу. В статье рассмотрены вопросы диагностики неполнофазных режимов токовых цепей, напряжений сети и витковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей, получающих питание от сети в условиях несимметрии напряжений. Проведен анализ векторных диаграмм токов, напряжений и дополнительных фазовых углов сдвига фазных токов, возникающих при несимметрии напряжений сети и межвитковых замыканиях. Полученные результаты позволили сформулировать критерии выявления начального момента виткового замыкания и двухфазных режимов сети и токовых цепей при стационарных режимах. Разработаны способ неразрушающего контроля состояния асинхронного двигателя, а также устройство для его реализации. Способ основан на сравнении векторов измеренных фазных токов с их расчетными значениями. Приведены результаты моделирования изменения векторов фазных токов от количества замкнутых витков в обмотке асинхронного двигателя. Установлен мощностной ряд асинхронных двигателей, для которых чувствительность выявления начального момента межвиткового замыкания максимальная. Получены аналитические результаты зависимости коэффициента чувствительности при межвитковых замыканиях от абсолютного приращения модулей фазных токов и соответствующих фазовых углов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, межвитковые замыкания, несимметрия напряжений сети, отклонения напряжений, векторная диаграмма, критерии диагностики, защита электродвигателя, моделирование, чувствительность защиты, неразрушающий контроль

Для цитирования: Жежеленко, И. В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя / И. В. Жежеленко, В. Е. Кривоносов, С. В. Василенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 202–218. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218>

Адрес для переписки

Кривоносов Валерий Егорович
Азовский морской институт Национального
университета «Одесская морская академия»
ул. Черноморская, 19,
87517, г. Мариуполь, Украина
Тел.: +380 97 821-73-25
inteh@ami.edu.ua

Address for correspondence

Kryvonosov Valerii E.
Azov Maritime Institute National
University "Odessa Maritime Academy"
19, Chornomors'ka str.,
87517, Mariupol, Ukraine
Tel.: +380 97 821-73-25
inteh@ami.edu.ua

Criteria for Detecting Turn-To-Turn Short Circuit in Stator Windings Using Vector Analysis of Electric Motor Phase Currents

I. V. Zhezhelenko¹⁾, V. E. Kryvonosov¹⁾, S. V. Vasilenko¹⁾

¹⁾Azov Maritime Institute National University "Odessa Maritime Academy"
(Mariupol, Ukraine)

Abstract. At industrial enterprises, seaports, ships, more than 80 % of all electrical engineering equipment is asynchronous motors. In a number of cases, asynchronous motors operate with a sharply variable load, in an aggressive environment; herewith they receive power from the network with deviations of the power quality indicators from the normative ones, which causes their high damageability. Turn circuits in the stator windings account for about 40 % of cases of damage to the insulation of the asynchronous motors windings. Untimely detection of the initial moment of the appearance of defects in the asynchronous motors or disruption of the operating modes of the supply network and current circuits result in emergency situations of the electrical complex, equipment downtime and damage. The article discusses the issues of diagnostics of non-full-phase modes of current circuits, mains voltages and turn circuits in the stator windings of the asynchronous motors that receiving power from the networks in conditions of voltage asymmetry. The analysis of the vector diagrams of currents, voltages and additional phase angles of the phase currents displacement arising from the asymmetry of the mains voltages and turn circuits in the stator windings has been fulfilled. The results obtained made it possible to formulate criteria for identifying the initial moment of the turn circuit and two-phase modes, both in the network and in current circuits, in stationary modes. A method for non-destructive testing of the asynchronous motors state as well as a device for its implementation has been developed. The method is based on comparing the vectors of the measured phase currents of the asynchronous motors with their calculated values. The article presents the results of modeling the change in the vectors of phase currents from the number of closed turns in the winding of the asynchronous motors. The power series of asynchronous motors was established, for which the sensitivity of detecting the initial moment of the turn-to-turn short circuit is maximum. Analytical results of the dependence of the sensitivity coefficient for turn-to-turn short circuit on the absolute increment of the modules of phase currents and the corresponding phase angles have been obtained.

Keywords: asynchronous motor, turn-to-turn short circuit, mains voltage unbalance, voltage deviations, vector diagram, diagnostic criteria, motor protection, simulation, protection sensitivity, non-destructive testing

For citation: Zhezhelenko I. V., Kryvonosov V. E., Vasilenko S. V. (2021) Criteria for Detecting Turn-To-Turn Short Circuit in Stator Windings Using Vector Analysis of Electric Motor Phase Currents. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 202–218. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218> (in Russian)

Введение

Простота конструкции и эксплуатационные качества асинхронных двигателей (АД) позволяют применять их в электротехнических комплексах промышленных предприятий, морских портов, судов и других отраслях. При эксплуатации АД в условиях, отличных от нормативных, срок их службы снижается в 2–5 раз [1]. Как правило, это вызвано снижением диэлектрической прочности изоляции обмоток статора, влиянием окружающей среды, технологическими перегрузками и др. [2]. Так, 70–80 % аварийных выходов АД происходят в результате повреждения изоляции, из них до 40 % случаев пробоя изоляции обмотки статора АД связаны с витковыми замыканиями. Стоит отметить, что витковые замыкания на ранней стадии (1,5 % короткозамкнутых витков обмотки статора от общего числа), а также несимметричные отклонения напряжений питающей сети, значения которых не превышают величин, нормируемых ГОСТ 13109–97,

не приводят к значительным перекасам токов в фазах АД. При таких условиях АД продолжает работать в обычном режиме, но в местах межвитковых замыканий, когда индуктивность статорной обмотки снижается на 10–15 %, ток в поврежденной обмотке может как увеличиваться на 15–18 % от рабочей величины, так и снижаться, симметрируя остальные фазные токи АД. Увеличение токов в местах межвиткового замыкания приводит к дополнительному локальному нагреву изоляции соседних неповрежденных витков и развитию двух-, трехфазных замыканий и замыканий на корпус [3].

Выявление неполнофазных режимов (токовых и напряжений сети), начального момента образования виткового замыкания в статорной обмотке АД является сложной задачей [4–6], особенно когда АД получает питание от сети с изменяющимися показателями качества электроэнергии (ПКЭ). Своевременное диагностирование аномальных режимов работы АД позволяет безаварийно провести коммутационные переключения и планово вывести оборудование для проведения профилактического ремонта, а значит, снизить аварийность электротехнического комплекса в целом.

Анализ последних исследований и публикаций

Методы диагностики межвитковых замыканий как в моменты технологических пауз, так и в процессе эксплуатации АД рассмотрены во многих отечественных и зарубежных работах.

Многочисленными и наиболее изученными являются методы тестовой диагностики [7]: в обмотке статора АД возбуждают магнитное поле, с помощью датчика выявляют его неоднородность, которая выступает критерием определения места виткового замыкания.

В [8] измерена электродвижущая сила и зафиксирована скорость ее затухания, проведено сравнение этих данных со значениями, полученными после отключений электродвигателя от сети.

Анализ методов тестовой диагностики проведен в [9]. Показано, что основная погрешность связана с нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Для повышения достоверности выявления дефектов в обмотках АД с помощью указанных методов необходимо проводить измерения характерных частотных составляющих измеряемого сигнала.

Известен метод непрерывной диагностики, основанный на контроле потребляемого тока [10], в котором измеряют линейные напряжения питающей сети и фазные токи АД, определяют величины коэффициентов несимметрии напряжения и тока, а также температуру статора двигателя. По максимальному значению коэффициента несимметрии напряжения судят о неполнофазном режиме питающей сети, по максимальному значению коэффициента несимметрии тока – об обрыве токовой цепи. Разница значений величин коэффициентов несимметрии тока и напряжений и повышенная температура обмотки статора АД указывают на витковое замыкание.

В [11] разработан способ защиты АД от витковых замыканий: одновременно измеряют амплитуды первой и резонансных гармоник тока и измеряют их частоты, существующие в диапазоне изменения индуктивности АД от пуска до установившегося режима.

В [12] представлен метод, основанный на формировании годографа вектора вращающегося магнитного поля и сравнении его с годографами векторов вращающихся магнитных полей исправного АД.

Методы тестовой диагностики нашли широкое применение при анализе до- и послеремонтных состояний АД. Оборудование для проведения тестов получает только симметричное питающее напряжение, что обеспечивает заданные чувствительность и достоверность выявления межвитковых замыканий.

Известные методы диагностики витковых замыканий в статорных обмотках АД не позволяют определить начальный момент их появления при изменяющихся ПКЭ питающей сети. В устройствах, реализующих эти способы, наличие несимметрии напряжения питающей сети требует снижения чувствительности за счет увеличения зоны доверительных интервалов, а в ряде случаев достоверно выявить начальный момент образования межвиткового замыкания невозможно.

Для изучения влияния ПКЭ питающей сети на диагностику межвитковых замыканий в обмотках статора АД проведены измерения уровней напряжения, частоты, изменения коэффициента несимметрии сети на шинах трансформаторных подстанций мощностью 136 и 250 кВт Мариупольского морского торгового порта.

Графики изменения усредненных на интервале в одну минуту действующих значений фазных напряжений на шинах 0,4 кВ подстанции ТП-4А приведены на рис. 1. Минимальные и максимальные действующие значения напряжения составили: 225,1 и 235,24 В – для фазы А; 225,92 и 236,98 В – для фазы В; 225,1 и 236,12 В – для фазы С. Математические ожидания фазных напряжений 230,86, 231,38, 230,75 В для фаз А, В и С соответственно. С вероятностью 95 % фазные напряжения находились в пределах: 227,4–233,9 В – для фазы А; 227,8–234,5 В – для фазы В; 227,5–233,7 В – для фазы С.

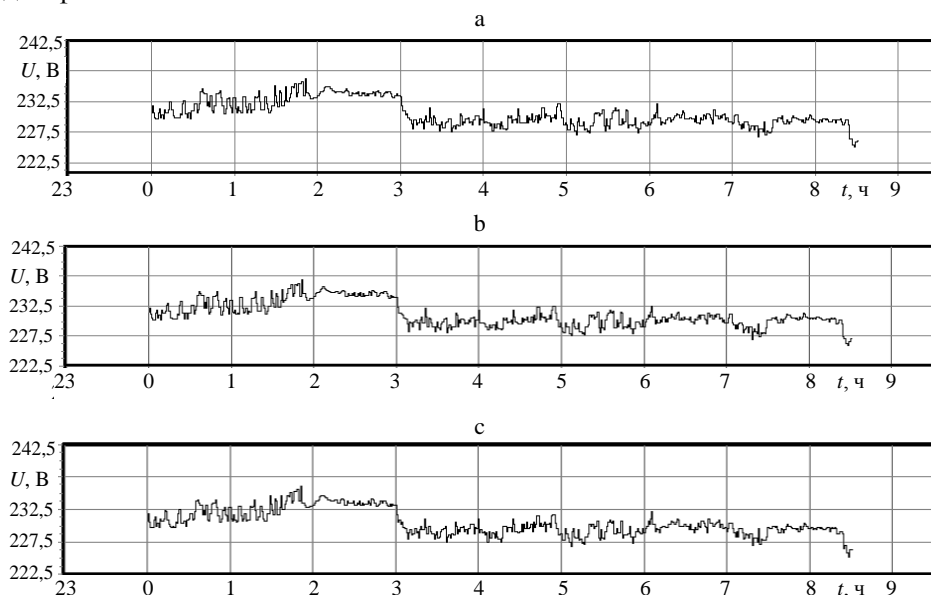


Рис. 1. Графики действующих значений фазных напряжений 0,4 кВ подстанции ТП-4А: а – фаза А; б – фаза В; с – фаза С

Fig. 1. The graphs of the effective values of the phase voltages of 0.4 kV of the TP-4A substation: a – phase A; b – phase B; c – phase C

Графики изменения частоты и коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ подстанции ТП-4А приведены на рис. 2. Математическое ожидание частоты сети составило 49,968 Гц, что не превышает нормируемого значения. Размах коэффициента несимметрии питающей сети 0,08–0,33 %.

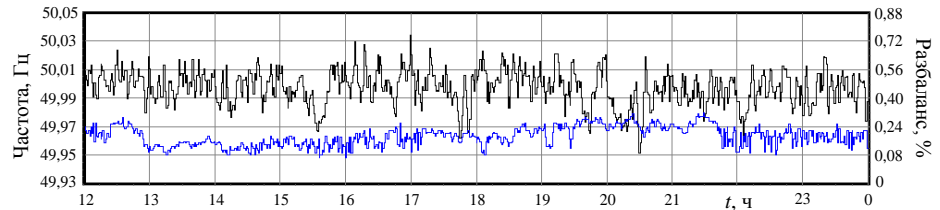


Рис. 2. Графики изменений частоты (черная кривая) и коэффициента несимметрии напряжений (синяя кривая) на шинах 0,4 кВ подстанции ТП-4А

Fig. 2. Graphs of changes in frequency (black) and voltage unbalance coefficient (blue) on 0.4 kV buses of the TP-4A substation

Графики (рис. 1, 2) показывают, что промышленные сети успешно работают с отклонениями ПКЭ, не превышающими значений, установленных ГОСТ 13109–97, и незначительно, но влияют на распределение фазных токов в обмотках АД [13]. Анализ результатов научных публикаций в области диагностики межвитковых замыканий в статорных обмотках АД показал, что влияние ПКЭ питающей сети на достоверность и чувствительность выявления начального момента межвиткового замыкания изучено недостаточно.

Цель данного исследования – усовершенствование метода выявления начального момента появления виткового замыкания в обмотках статора АД на основании векторного анализа фазных токов, контроля неполнофазных режимов тока и напряжений питающей сети в условиях изменяющихся ПКЭ питающей сети.

Проведение исследований

Изменяющиеся уровни фазных напряжений питающей сети и межвитковые замыкания приводят к изменению уровней токов и фазовых углов в обмотке статора АД. Векторные диаграммы (без учета масштаба) фазных токов, напряжений питающей сети, фазовых углов между токами и напряжениями и дополнительных углов сдвига фазных токов, вызванных несимметрией напряжений сети, витковыми замыканиями и их совместным воздействием, приведены на рис. 3.

Обозначения на рис. 3: U_a, U_b, U_c – симметричные фазные напряжения; I_a, I_b, I_c – рабочие фазные токи при симметричном напряжении; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ – фазовые углы между напряжениями U_a, U_b, U_c и токами I_a, I_b, I_c ; U'_a, U'_b, U'_c – фазные напряжения при несимметричном питающем напряжении; I'_{bU}, I'_{cU} – фазные токи, вызванные несимметрией фазных напряжений; $\Delta\varphi_n, \Delta\varphi_m$ – дополнительные углы сдвига фазных напряжений при несимметрии; $\varphi'_{bU}, \varphi'_{cU}$ – фазовые углы между фазными напряжениями U'_b, U'_c и токами I'_{bU}, I'_{cU} ; $\Delta\varphi_{bU}, \Delta\varphi_{cU}$ – дополнительные углы сдвига фазных токов, вызванные несимметрией и отклонением напряжений, равные $\Delta\varphi_m, \Delta\varphi_n$ соответственно; I'_{aR} – фазный ток, вызванный витковым замыканием в параллельных проводниках катушки обмотки фазы А; φ'_{aR} – фазовый угол между U_a и I'_{aR} ; $\Delta\varphi_{aR} = \varphi_a - \varphi'_{aR}$ – дополнительный угол сдвига фазного тока при витковых замыканиях в парал-

лельных проводниках; I'_{aZ} – фазный ток, вызванный витковым замыканием в обмотке фазы A , намотанной одним проводником; φ'_{aZ} – фазовый угол между U_a и I'_{aZ} ($\varphi'_{bZ}, \varphi'_{cZ}$ для фаз B, C соответственно); $\Delta\varphi_{aZ} = \varphi_a - \varphi'_{aZ}$ – дополнительный угол сдвига фазного тока при витковых замыканиях в обмотке фазы A ; I'_a, I'_b, I'_c – фазные токи при несимметричных напряжениях и витковом замыкании в одной из фаз; φ'_b, φ'_c – фазовые углы между фазными напряжениями U'_b, U'_c и токами I'_b, I'_c ; $\Delta\varphi_b = \Delta\varphi_m + \Delta\varphi_{bZ}$ – дополнительный угол сдвига фазного тока при совместном воздействии отклонения напряжений и витковых замыканий в фазе B .

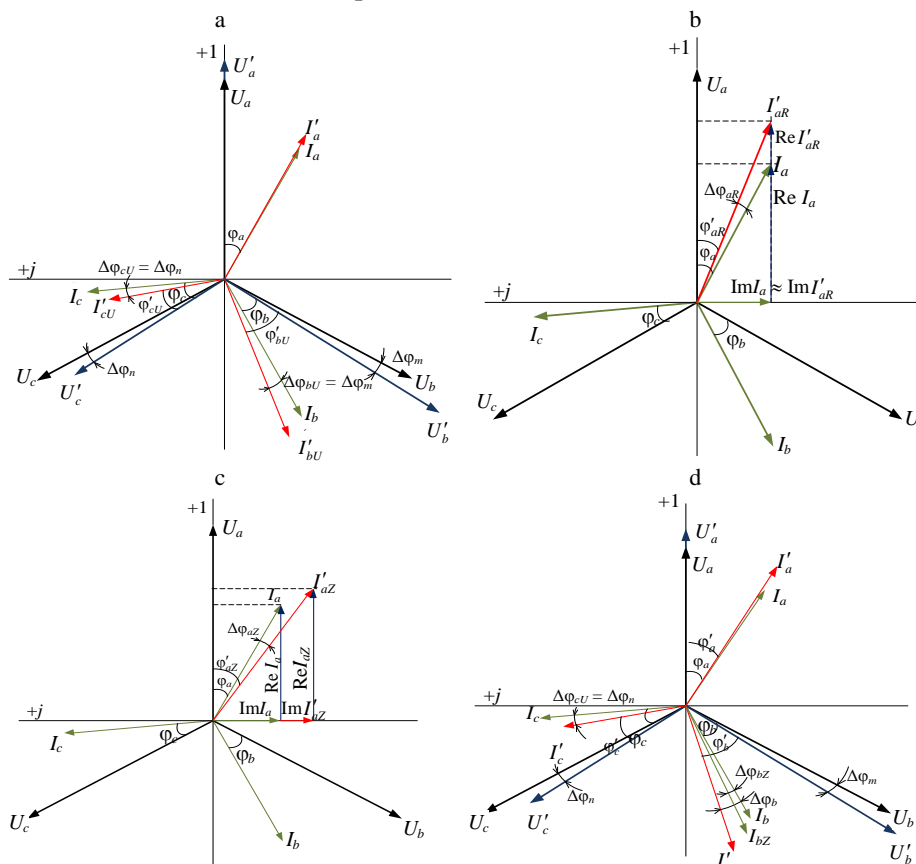


Рис. 3. Векторные диаграммы фазных токов асинхронных двигателей и напряжений в условиях симметрии и несимметрии напряжений сети для различных видов межвитковых замыканий в обмотках: а – отсутствие межвиткового замыкания при несимметричных напряжениях питающей сети; б – замыкание в параллельных проводниках катушки статорной обмотки фазы A при симметричных напряжениях питающей сети; в – межвитковое замыкание в однопроводной катушке статорной обмотки асинхронного двигателя при симметричных напряжениях питающей сети; д – межвитковое замыкание в катушке при несимметричных напряжениях сети

Fig. 3. Vector diagrams of asynchronous motors phase currents and voltages in conditions of symmetry and asymmetry of the mains voltages for various types of turn-to-turn short circuits in the stator windings of the asynchronous motor: а – absence of turn-to-turn short circuit at asymmetrical supply voltage; б – short circuit in parallel conductors of the stator winding coil of phase A in conditions of symmetrical supply voltage; в – turn-to-turn short circuit in a single-phase winding of the asynchronous motor, under conditions of symmetrical supply voltage; д – turn-to-turn short circuit in the coil at unbalanced mains voltages

Анализ векторов токов и напряжений (рис. 3):

– увеличение или уменьшение уровней фазных токов I'_{bU} , I'_{cU} и фазовых углов φ'_{bU} , φ'_{cU} обусловлено изменением уровней фазных (или линейных) напряжений сети U'_a , U'_b , U'_c (рис. 3а);

– замыкание параллельных проводников в катушке статорной обмотки АД, например фазы A , приводит к увеличению активной составляющей фазного тока I'_{aR} и, соответственно, фазового угла φ'_{aR} (рис. 3б);

– витковое замыкание в однослойной обмотке, выполненной одним проводом, приводит к изменению вектора фазного тока I'_{aZ} и дополнительного фазового угла $\Delta\varphi'_{aZ}$ (рис. 3с);

– витковое замыкание в катушке, в данном случае в обмотке фазы B , при изменяющихся уровнях напряжений U'_a , U'_b , U'_c неоднозначно изменяет величины векторов фазных токов I'_a , I'_b , I'_c и дополнительных углов $\Delta\varphi_b$, $\Delta\varphi_{cU}$ (рис. 3д). При максимальном значении уровней напряжений, поданных на обмотку с межвитковым замыканием, фазные токи могут увеличиваться (I'_a , I'_b), при минимальном – уменьшаться (I'_c).

Для выявления начального момента межвиткового замыкания в обмотке и защиты АД от неполнофазных режимов сети и обрыва токовых цепей разработан метод, основанный на сравнении величин измеренных фазных токов I'_a , I'_b , I'_c и фазовых углов φ'_a , φ'_b , φ'_c с расчетными значениями соответствующих токов I_{ap} , I_{bp} , I_{cp} и углов φ_{ap} , φ_{bp} , φ_{cp} .

Величины рабочего и расчетного токов АД зависят от мощности, уровней напряжений и частоты сети, схемы соединения обмоток и их конструкции, точности определения параметров схемы замещения. Проведенные исследования показали, что изменения величин токов при наличии межвиткового замыкания в статорной обмотке зависят от паспортной мощности и конструкции АД. Определить область использования метода позволяет анализ зависимости коэффициентов чувствительности изменений фазного тока $\Delta I'_{aZ}$ при витковом замыкании в фазе A и фазового угла сдвига $\Delta\varphi'_{aZ}$ от количества замкнутых витков в катушке обмотки.

Коэффициенты чувствительности по току $k_{\Delta I}$, фазовому углу $k_{\Delta\varphi}$ и коэффициент изменения числа витков в пазу $k_{\Delta w}$ определяются по выражениям:

$$k_{\Delta I} = \frac{\Delta I'_{aZ}}{I'_a}; \quad (1)$$

$$k_{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi'_{aZ}}{\varphi'_a}; \quad (2)$$

$$k_{\Delta w} = \frac{w_k}{S_n}, \quad (3)$$

где w_k – количество замкнутых витков в пазу; S_n – количество витков в пазу обмотки.

Графики зависимости коэффициентов чувствительности $k_{\Delta\varphi}$, $k_{\Delta I}$ от коэффициента $k_{\Delta w}$ для двигателей мощностью 0,75; 1,1; 5,5; 15; 22; 55; 75 кВт приведены на рис. 4.

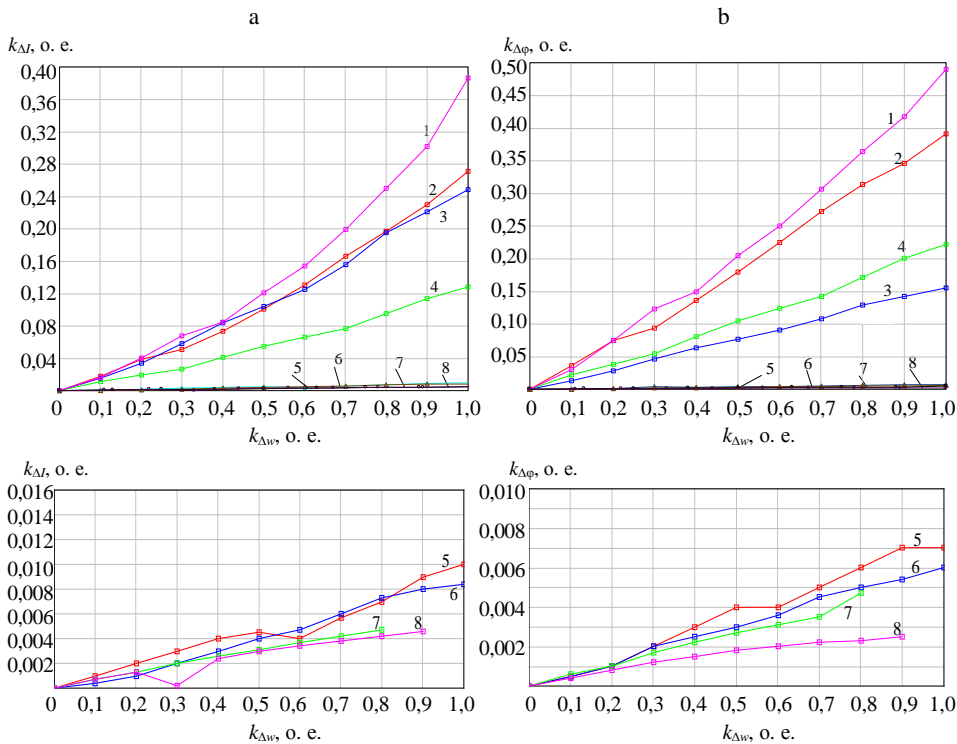


Рис. 4. Зависимости от $k_{\Delta w}$ коэффициентов:
 а – чувствительности фазного тока $k_{\Delta I}$;
 б – чувствительности сдвига фазового угла $k_{\Delta\varphi}$;
 1 – 4А160М6У3 15 кВт; 2 – 4А71А4У3 0,75 кВт; 3 – 4А112М4У3 5,5 кВт;
 4 – 4А80А4У3 1,1 кВт; 5 – 4А160S4У3 15 кВт; 6 – 4А180S4У3 22 кВт;
 7 – 4А250М6У3 55 кВт; 8 – 4А250S4У3 75 кВт

Fig. 4. Dependencies on $k_{\Delta w}$ of coefficients:
 а – current sensitivity $k_{\Delta I}$; б – phase angle sensitivity $k_{\Delta\varphi}$;
 1 – 4A160M6U3 15 kW; 2 – 4A71A4U3 0,75 kW; 3 – 4A112M4U3 5,5 kW;
 4 – 4A80A4U3 1,1 kW; 5 – 4A160S4U3 15 kW; 6 – 4A180S4U3 22 kW;
 7 – 4A250M6U3 55 kW; 8 – 4A250S4U3 75 kW

Анализ графиков (рис. 4) показывает, что для АД мощностью 15 кВт и выше, имеющих одно- и двухслойные обмотки с параллельными проводниками, изменение приращений векторов фазных токов, даже при 90 % замкнутых витков в пазу, – аварийный режим, коэффициенты чувствительности стремятся к нулю, что не позволяет применять метод, основанный на анализе векторных величин.

Для АД мощностью 15 кВт и ниже с обмотками, выполненными намотанными одним проводом катушками, изменение коэффициентов чувствительности от 2 % при замыкании 10 % витков пазы (что соответствует 2–8 виткам) позволяет использовать предложенный метод.

Блок-схема устройства, реализующего метод диагностики и защиты АД от аномальных режимов сети и токовых цепей, а также позволяющего выявлять начальный момент межвиткового замыкания в статорной обмотке, приведена на рис. 5.

В устройстве непрерывно контролируются параметры питающей сети и АД. Отсутствие одного из фазных токов и наличие трех линейных напряжений выявляет неполнофазный режим токовых цепей. Отсутствие одного из линейных напряжений указывает на неполнофазный режим питающей сети. Выявленный неполнофазный режим сопровождается сигнализацией, и с выдержкой времени 2–2,5 постоянного нагрева АД отключается от сети или блокируется от подключения к сети. Выявление начального момента появления межвиткового замыкания сопровождается сигнализацией. При достижении критической величины замкнутых витков в пазу (более 10 %) АД отключается от сети.

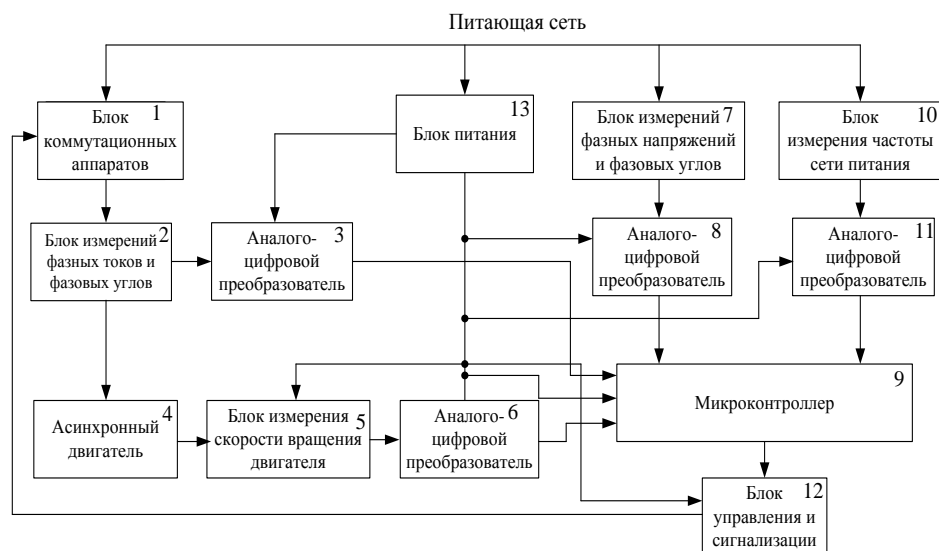


Рис. 5. Блок-схема устройства диагностики и защиты асинхронного двигателя

Fig. 5. Block diagram of the device for diagnostics and protection of asynchronous motor

Для работы устройства важно установление критериальных зависимостей между измеряемыми и расчетными величинами параметров сети и АД. В данном случае целесообразно использовать теорию множеств случайных событий и элементы Булевой алгебры. Рассматриваются следующие множества значений:

– измеряемых векторов рабочих фазных токов

$$\underline{I}_a \in \{\underline{I}_a\}; \underline{I}_b \in \{\underline{I}_b\}; \underline{I}_c \in \{\underline{I}_c\}; \quad (4)$$

– измеряемых векторов фазных (линейных) напряжений

$$\underline{U}_a \in \{\underline{U}_a\}; \underline{U}_b \in \{\underline{U}_b\}; \underline{U}_c \in \{\underline{U}_c\}; \quad (5)$$

– частоты сети

$$f_{\text{П.С.}} \in \{f_{\text{П.С.}}\}; \quad (6)$$

– скорости вращения ротора АД

$$n_{\text{рот}} \in \{n_{\text{рот}}\}; \quad (7)$$

– коэффициента, определяющего изменение числа витков в пазу обмотки статора при витковых замыканиях

$$k_{\Delta w} \in \{k_{\Delta w}\}. \quad (8)$$

Критериальные зависимости определены для установившегося режима, условиями которого являются: $f_{\text{П.С.}} = \text{const}$; $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c = \text{const}$; $n_{\text{рот}} = \text{const}$.

Критерием нормальной работы АД являются функции:

а) $F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{1, 1, 1\} = \underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c$, при $\underline{U}_a \neq 0$, $\underline{U}_b \neq 0$, $\underline{U}_c \neq 0$ соответствует истинному значению – логическая «1»;

б) $F(\{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\}, \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\}, \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}) = \{1, 1, 1\} = \{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\} / \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\} / \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}$, при $\{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\}$, $\{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\}$, $\{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}$ соответствует истинному значению – логическая «1», где \underline{I}_{ap} , \underline{I}_{bp} , \underline{I}_{cp} – расчетные значения векторов фазных токов АД,

$$\underline{I}_{ap}, \underline{I}_{bp}, \underline{I}_{cp} = F(\{\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c\}, n_{\text{рот}}, f_{\text{П.С.}}, \{Z_{wi}\}), \quad (9)$$

где Z_{wi} – полное комплексное сопротивление схемы замещения АД в i -й фазе.

Критерием неполнофазного режима напряжений питающей сети является функция

$$F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{0, 0, 0\} = \{\underline{U}_a / \underline{U}_b\} \vee \{\underline{U}_a / \underline{U}_c\}.$$

Критерием обрыва, недовключения одной из фаз токовых цепей, повреждения кабельной линии и других ситуаций является выполнение условия

$$F_1\{F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c), F(\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c)\} = (\underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c) / (\{\underline{I}_a / \underline{I}_b\} \vee \{\underline{I}_a / \underline{I}_c\}),$$

где $F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{1, 1, 1\} = \underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c$ соответствует наличию ненулевых значений фазных напряжений; $F(\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c) = \{0, 0, 0\} = \{\underline{I}_a / \underline{I}_b\} \vee \{\underline{I}_a / \underline{I}_c\}$ соответствует отсутствию тока в одной из фаз; $\underline{I}_a \neq 0$, $\underline{I}_b \neq 0$, $\underline{I}_c \neq 0$ соответствуют истинному значению – логическая «1».

Критерии выявления начального момента межвиткового замыкания в обмотке статора АД:

а) $F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{1, 1, 1\} = \underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c$;

б) $F(\{\underline{I}_a \setminus \underline{I}_{ap}\}, \{\underline{I}_b \setminus \underline{I}_{bp}\}, \{\underline{I}_c \setminus \underline{I}_{cp}\}) = \{0, 0, 0\} = \{\underline{I}_a \setminus \underline{I}_{ap}\} \setminus \{\underline{I}_b \setminus \underline{I}_{bp}\} \setminus \{\underline{I}_c \setminus \underline{I}_{cp}\}$,
при $\{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\}, \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\}, \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}$ соответствует истинному значению – логическая «1».

Критериальные зависимости позволили разработать программное обеспечение для работы микроконтроллера устройства, реализующего способ [14].

На достоверность и чувствительность выявления межвиткового замыкания влияет точность определения \underline{I}_{ap} , \underline{I}_{bp} , \underline{I}_{cp} , величины которых зависят от достоверности определения параметров схемы замещения (ПСЗ) АД.

Для анализа режимов работы АД, тепловых моделей используется Т-образная схема замещения. Существуют различные методики определения ПСЗ АД: по каталожным данным; методом идентификации; методом использования опыта холостого хода и короткого замыкания [15, 16]. В [17] выполнен сравнительный анализ погрешностей при определении ПСЗ по каталожным данным и методом идентификации, показавший следующее: для АД мощностью до 1 кВт погрешность составляет 17 % для сопротивлений рассеяния и активных сопротивлений и не выше 18 % для ветви намагничивания; для АД от 1 до 15 кВт погрешность составляет 13 % для сопротивлений рассеяния и активных сопротивлений и не выше 15 % для ветви намагничивания. В [18] представлен метод онлайн-идентификации электромагнитных параметров АД, позволяющий выполнять анализ установившегося режима работы АД без использования Т-образной схемы замещения, для чего необходимо решить систему алгебраических уравнений четвертого порядка.

В [19] проведен сравнительный анализ известных, часто применяемых методов расчета ПСЗ АД с уточненной методикой. Значения погрешности величин ПСЗ АД колеблются в пределах 8–12 % для АД мощностью 5–10 кВт и 15–22 % для АД мощностью 0,55–5 кВт.

Комплексное сопротивление каждой фазы АД, имеющей однослойную обмотку, намотанную одним проводником, определяется выражением

$$\underline{Z}_{wi} = (1 - k_z)^2 \left[\left(\frac{r_1}{1 - k_z} + jx_1 \right) + \frac{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \left(\frac{r_\mu}{(1 - k_z)^2} + jx_\mu \right)}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + \left(r_\mu + j(1 - k_z)^2 x_\mu \right)} \right], \quad (10)$$

где $k_z = \frac{k_{\Delta w}}{q_1}$ – коэффициент отношения замкнутых витков в пазу к общему числу витков в обмотке; q_1 – количество пазов фазовой обмотки; r_1 , x_1 – активное и индуктивное сопротивления рассеяния статорной обмотки; r'_2 , x'_2 – приведенные к статорной обмотке активное и индуктивное

сопротивления рассеяния роторной обмотки; $s = \frac{n_o - n_{изм}}{n_o}$ – скольжение

АД; n_o – скорость вращения магнитного поля статора; $n_{изм}$ – измеренная скорость ротора АД; r_μ , x_μ – активное и индуктивное сопротивления намагничивающего контура.

Комплексное сопротивление каждой фазы АД с одно- и двухслойными обмотками, с параллельными проводниками определяется выражением

$$\underline{Z}_{wi} = \left(\frac{r_1}{1 + \frac{k_Z}{m_1 - n}} + jx_1 \right) + \frac{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (11)$$

где m_1 – число параллельных проводников в катушке обмотки статора; n – число замкнутых параллельных проводников.

Фазное напряжение при наличии отклонения напряжения сети

$$\underline{U}_{\phi i} = (1 + \Delta U_{\phi i}) e^{j\Delta\phi_i} \underline{U}_{\phi n}, \quad (12)$$

где $U_{\phi i}$ – измеренное напряжение в i -й фазе; $\Delta U_{\phi i}$ – отклонение напряжения в i -й фазе; $\Delta\phi_i$ – дополнительный угол сдвига фазного напряжения при несимметрии; $\underline{U}_{\phi n}$ – комплексное номинальное фазное напряжение.

Величины фазных токов АД определяются как

$$\underline{I}_{ip} = \frac{\underline{U}_{\phi i}}{\underline{Z}_{wi}} = \frac{(1 + \Delta U_{\phi i}) e^{j\Delta\phi_i} \underline{U}_{\phi n}}{(1 - k_Z)^2 \left[\left(\frac{r_1}{1 - k_Z} + jx_1 \right) + \frac{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \left(\frac{r_\mu}{(1 - k_Z)^2} + jx_\mu \right)}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + (r_\mu + j(1 - k_Z)^2 x_\mu)} \right]}, \quad (13)$$

где \underline{I}_{ip} – расчетное значение фазного тока в i -й фазе при несимметрии напряжений и витковых замыканиях.

На основании полученных выражений произведены расчеты изменений значений комплексных сопротивлений АД по (10), приращения фазных токов согласно уравнению (13), дополнительного угла сдвига фазного тока, коэффициентов чувствительности для АД различной мощности при симметричном питающем напряжении. Расчеты параметров схем замещения проведены по методике [19] для рабочего тока $I_p = 0,8 I_{ном}$.

Результаты расчетов параметров для АД мощностью 1,1 и 15,0 кВт (обмотка однослойная, $m_1 = 0$), 22,0 кВт (обмотка однослойная, $m_1 = 3$), 75,0 кВт (обмотка двухслойная, $m_1 = 4$) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры асинхронных двигателей
при различном количестве замкнутых витков**

Parameters of asynchronous motors with a different number of closed turns

Наименование параметра	Значение параметра									
	при количестве замкнутых витков w_k в пазу обмотки									
	асинхронного двигателя 4А80А4У3 ($P = 1,1$ кВт, $n = 1500$ об/мин, $m_1 = 0$, $S_n = 60$, $I_{ном} = 2,65$ А, $I_p = 0,8 I_{ном}$)									
	0	5	15	20	25	30	35	40	50	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Приращение угла $\Delta\varphi_{aZ}$, градус	0	0,54	1,63	2,18	2,74	3,30	3,85	4,41	5,53	6,63
Приращение тока ΔI_{aZ} , А	0	0,032	0,102	0,140	0,179	0,221	0,265	0,312	0,414	0,527
Комплексное сопротивление $ Z_{w} $, Ом	104,3	102,7	99,4	97,8	96,1	94,3	92,6	90,8	87,1	83,4
Коэффициент чувствительности по фазному углу $k_{\Delta\varphi}$, о. е.	0	0,013	0,038	0,051	0,064	0,077	0,091	0,103	0,129	0,155
Коэффициент чувствительности по току $k_{\Delta I}$, о. е.	0	0,015	0,048	0,066	0,084	0,104	0,125	0,147	0,195	0,248
	асинхронного двигателя 4А160М6У3 ($P = 15$ кВт, $n = 1000$ об/мин, $m_1 = 0$, $S_n = 34$, $I_{ном} = 26,4$ А, $I_p = 0,8 I_{ном}$)									
	0	3	7	11	15	20	25	27	30	34
Приращение угла $\Delta\varphi_{aZ}$, градус	0	0,97	2,45	4,04	5,79	8,19	10,83	11,95	13,69	16,11
Приращение тока ΔI_{aZ} , А	0	0,34	0,85	1,46	2,18	3,28	4,67	5,33	6,44	8,24
Комплексное сопротивление $ Z_{w} $, Ом	10,32	10,15	9,92	9,65	9,36	8,94	8,46	8,25	7,92	7,44
Коэффициент чувствительности по фазному углу $k_{\Delta\varphi}$, о. е.	0	0,030	0,075	0,123	0,176	0,250	0,330	0,364	0,417	0,490
Коэффициент чувствительности по току $k_{\Delta I}$, о. е.	0	0,016	0,040	0,068	0,102	0,154	0,219	0,250	0,302	0,386
	асинхронного двигателя 4А180S4У3 ($P = 22$ кВт, $n = 1500$ об/мин, $m_1 = 3$, $S_n = 23$, $I_{ном} = 38,2$ А, $I_p = 0,8 I_{ном}$)									
	0	3	5	7	9	13	15	17	21	23
Приращение угла $\Delta\varphi_{aZ}$, градус	0	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,11	0,12	0,14	0,14
Приращение тока ΔI_{aZ} , А	0	0,045	0,073	0,099	0,124	0,168	0,188	0,206	0,240	0,256
Комплексное сопротивление $ Z_{w} $, Ом	7,29	7,28	7,28	7,27	7,26	7,25	7,25	7,24	7,23	7,23
Коэффициент чувствительности по фазному углу $k_{\Delta\varphi}$, о. е.	0	0,0010	0,0020	0,0025	0,0030	0,0040	0,0045	0,0050	0,0054	0,0060

Окончание табл. 1

End of Table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Коэффициент чувствительности по току $k_{\Delta I}$, о. е.	0	0,0010	0,0020	0,0030	0,0040	0,0054	0,0060	0,0067	0,0080	0,0084
	асинхронного двигателя 4А250S4У3 ($P = 75$ кВт, $n = 1500$ об/мин, $m_1 = 4$, $S_n = 9 + 9$, $I_{ном} = 126,8$ А, $I_p = 0,8 I_{ном}$)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Приращение угла $\Delta\varphi_{aZ}$, градус	0	0,011	0,021	0,030	0,038	0,044	0,050	0,055	0,059	0,062
Приращение тока ΔI_{aZ} , А	0	0,069	0,134	0,195	0,251	0,303	0,351	0,397	0,439	0,478
Комплексное сопротивление $ Z_{\text{вл}} $, Ом	2,113	2,111	2,110	2,109	2,108	2,107	2,106	2,105	2,104	2,103
Коэффициент чувствительности по фазному углу $k_{\Delta\varphi}$, о. е.	0	0,0004	0,0008	0,0012	0,0015	0,0018	0,0020	0,0220	0,0230	0,0025
Коэффициент чувствительности по току $k_{\Delta I}$, о. е.	0	0,0007	0,0013	0,0020	0,0024	0,0030	0,0034	0,0038	0,0042	0,0046

По данным табл. 1 построена векторная диаграмма токов и симметричных напряжений при 5, 11, 20 и 30 замкнутых витках в пазу обмотки фазы А (рис. 6).

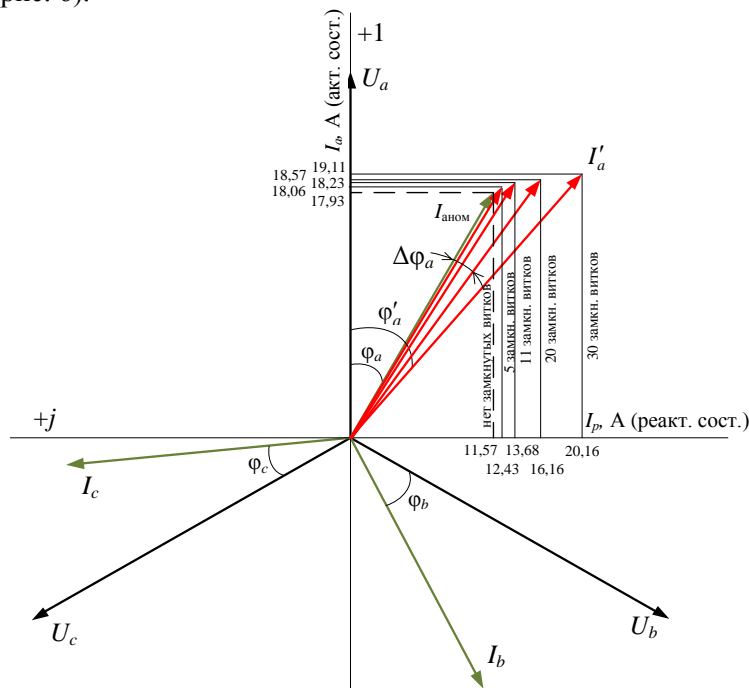


Рис. 6. Векторная диаграмма токов и симметричных фазных напряжений при различных значениях замкнутых витков в фазе А для асинхронного двигателя типа 4А160М6У3 мощностью 15 кВт

Fig. 6. Vector diagram of currents and symmetrical phase voltages at different values of closed turns in phase A for type 4A160M6U3 asynchronous motor with a power of 15 kW

ВЫВОДЫ

1. Для асинхронных двигателей мощностью 15 кВт и выше, имеющих одно- и двухслойные обмотки с параллельными проводниками, изменение приращений векторов фазных токов, даже при 90 % замкнутых витков, – аварийный режим, и коэффициенты чувствительности стремятся к нулю, что не позволяет применять метод, основанный на анализе векторных величин фазных токов при выявлении витковых замыканий в параллельных проводниках.

2. Для асинхронных двигателей мощностью 15 кВт и ниже с обмотками, выполненными намотанными одним проводом катушками, изменения коэффициентов чувствительности $k_{\Delta I}$ и $k_{\Delta \varphi}$ от 2 % при замыкании 10 % витков в пазу позволяют использовать метод, основанный на анализе векторных величин фазных токов, для диагностики витковых замыканий.

3. Установленные критериальные зависимости между контролируемыми параметрами сети и асинхронного двигателя позволили разработать устройство диагностики и защиты асинхронных двигателей и программное обеспечение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомутов, С. О. Система поддержания надежности электрических двигателей на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции [Электронный ресурс] / С. О. Хомутов. Барнаул: ООО МЦ «ЭОР», 2015. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Разработка метода и алгоритма диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей / А. А. Ткаченко [и др.] // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: сб. науч. тр. 2011. № 2 (8-Е). С. 154–160.
3. Кривоносов, В. Е. Срок службы изоляции при отклонениях напряжений и учете отклонений активных сопротивлений обмоток статора асинхронного двигателя / В. Е. Кривоносов, И. Т. Карполюк, С. В. Василенко // 36. ст. наук.-информ. центру «Знання» за матеріалами ЛІІ Міжнар. наук.-практ. конф. «Розвиток науки в ХХІ столітті», Харків, 15 окт. 2019 г. Харків, 2019. С. 57–65.
4. Попович, О. М. Розробка засобів проектування системи діагностування пошкоджень обмотки статора / О. М. Попович, М. С. Гуторова // Гідроенергетика України. 2017. № 3–4. С. 47–52.
5. Петухов, В. В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока [Электронный ресурс] / В. В. Петухов, В. А. Соколов // Новости Электротехники. 2005. Т. 31, № 1. Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php>.
6. Гуторова, М. С. Моделирование магнитного поля в промежутке асинхронных двигателей за витковых замыканий обмотки статора / М. С. Гуторова // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: зб. наук. пр. 2015. Вип. 40. С. 90–94.
7. Спосіб виявлення короткозамкнутих витків в обмотках електричних машин та пристрій для його здійснення: пат. 36791 UA, G01R31/06 / В. М. Манько. Опубл. 16.04.2001.
8. Спосіб оцінки стану міжвиткової ізоляції електродвигуна: пат. 88707 UA, МПК G01R 31/00, G01R 31/06 / М. П. Барбинягра. № a200800902. Опубл. 10.11.2009.
9. Шейников, А. А. Использование динамических свойств спектров последовательностей радиоимпульсов для обеспечения высокой чувствительности тестового контроля обмо-

- ток асинхронных двигателей / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 36–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-36-46>.
10. Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий: а. с. 1584028 СССР, Н02Н 7/085, 7/08 / В. Е. Кривонос, И. В. Жежеленко, Б. Ф. Рыбалко. Опубл. 07.08.1990.
 11. Спосіб захисту асинхронного електродвигуна від виткових замикань: пат. 105420 UA, МПК Н02Н7/08, G01R31/00, G01R31/06 / В. І. Чернишев. Опубл. 12.05.2014.
 12. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в процессе его функционирования / Р. Г. Мугалимов [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2018. Т. 40, № 3. С. 70–78.
 13. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
 14. Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна: комп'ютерна програма: а. с. 96405 Україна / В. Є. Кривонос [та ін.]. Опубл. 27.02.2020. 1 с.
 15. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников. М.: Энергия, 1984. 240 с.
 16. Расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей [Электронный ресурс] / В. М. Гридин. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2011. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
 17. Кувшинов, А. И. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя на основе экспертных оценок / А. И. Кувшинов, Н. И. Муха, О. А. Онищенко // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. 2007. Вып. 12. С. 78–85.
 18. Онлайн-идентификация электромагнитных параметров асинхронного двигателя / В. А. Тыгюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 5. С. 423–440. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-423-440>.
 19. Kryvonosov, V. E. Comparative Analysis of Methods for Calculating the Parameters of Asynchronous Engines for Reference Data / V. E. Kryvonosov, S. V. Vasilenko // Österreichisches Multiscience Journal. 2019. Vol. 1, No 18. P. 36–42.
- Поступила 25.11.2020 Подписана в печать 02.03.2021 Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Khomutov S. O. (2015) *The System for Maintaining the Reliability of Electric Motors on the Basis of Complex Diagnostics and Effective Technology of Insulation Restoration*. Barnaul, LLC MC “EOR”. 1 Electron. Opt. Disk (CD-ROM) (in Russian).
2. Tkachenko A. A., Shul'ga A. A., Polupan I. I., Besh A. N. (2011) Development of a Device for Diagnosing Breaks and Interturn Short-Circuits in Stator Windings of Asynchronous Motors. *Nauchnyi Vestnik Donbasskoi Gosudarstvennoi Mashinostroitel'noi Akademii: Sb. Nauch. Tr. = Scientific Herald of the Donbass State Engineering Academy*, 8-E (2), 154–160 (in Russian).
3. Kryvonosov V. E., Karpolyuk I. T., Vasilenko S. V. (2019) Insulation Service Life under Conditions of Voltage Deviations and Taking into Account Deviations of Active Resistances of Stator Windings of an Induction Motor. *Zbirnik Statei Naukovo-Informatsiinogo Tsentru “Znannya” za Materialami LIII Mizhnarodnoi Naukovo-Praktichnoi Konferentsii: “Rozvitok Nauki v XXI Stolitti”, Kharkiv, 15 Okt. 2019 g.* [Collected Articles of the Science and Information Center “Knowledge” Based on Materials of the LIII International Scientific and Practical Conference on the “Development of Science in the XXI Century”, Kharkiv, 15 Oct. 2019]. Kharkiv, 57–65 (in Russian).

4. Popovich O. M., Gutorova M. S. (2017) Development of the Design of and Diagnostics for the Stator Winding. *Gidroenergetika Ukraini* [Hydropower Science in Ukraine], (3–4), 47–52 (in Ukrainian).
5. Petukhov V. V., Sokolov V. A. (2005) Diagnostics of the Condition of Electric Motors. Method of Spectral Analysis of Current Consumption. *Novosti Elektrotehniki* [Electrical Engineering News], 31 (1). Available at: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (in Russian).
6. Gutorova M. S. (2015) Model of the Magnetic Field in the Gap between Asynchronous Motors for the Orbit Looping of the Stator Winding. *Pratsi Institutu Elektrodinamiki Natsional'noi Akademii Nauk Ukraini* [Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine], (40), 90–94 (in Ukrainian).
7. Man'ko V. M. (2001) *Method of Detecting Short-Circuited Turns in Windings of Electric Machines and Device for its Implementation*. Patent No 36791 Ukraine (in Ukrainian).
8. Barbinyagra M. P. (2009) *Method of Assessing the State of the Interturn Insulation of the Motor*. Patent No 88707 Ukraine (in Ukrainian).
9. Sheinikov A. A., Sukhodolov 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institution and Power Engineering Associations*, 61 (1), 36–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-36-46> (in Russian).
10. Kryvonosov V. E., Zhezhelenko I. V., Rybalko B. F. (1990) *Device for Monitoring and Protecting the Electric Motor from Incomplete Phase Modes and Turn Circuits*. Certificate of Authorship No 1584028 (in Russian).
11. Chernyshev V. I. (2014) *The Method of Protection of an Induction Motor from Turn Circuits*. Patent No 105420 Ukraine (in Ukrainian).
12. Mugalimov R. G., Mugalimova A. R., Kalugin U. A., Odintsov K. E. (2018) Methods for Diagnostics and Identification of Faults in the Windings of an Induction Motor in the Process of its Functioning. *Elektrotehnicheskie Sistemy i Kompleksy = Electrotechnical Systems and Complexes*, 40 (3), 70–78 (in Russian).
13. Zhezhelenko I. V., Sayenko Y. L. (2000) *Electrical Power Quality Indicators and their Control at Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 252 (in Russian).
14. Kryvonosov V. E., Hryb O. G., Karpalyuk I. T., Kryvonosov V. V., Boryakin A. O., Vasilenko S. V. (2020) *Computer Program "Device for Diagnostics of Incomplete Phase Modes of the Network, Current Circuits, the Initial Moment of the Short Circuit in the Stator Windings and Motor Protection"*. Certificate of Authorship No 96405 (in Ukrainian).
15. Syromyatnikov I. A. (1984) *Modes of Operation of Asynchronous and Synchronous Motors*. Moscow, Energiya Publ. 240 (in Russian).
16. Gridin V. M. (2011) *Calculation of Parameters and Characteristics of Asynchronous Motors*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ. 1 electron. opt. disc (CD-ROM) (in Russian).
17. Kuvshinov A. I., Mukha N. I., Onishchenko O. A. (2007) Identification of the Parameters of the Equivalent Circuit of an Asynchronous Electric Motor Based on Expert Evaluations. *Avtomatizatsiya Sudovykh Tekhnicheskikh Sredstv: Nauch.-Tekhn. Sb.* [Automation of Ship Technical Means: Collection of Scientific and Technical Papers], (12), 78–85 (in Russian).
18. Tytiuk V. K., Baranovskaya M. L., Chornyi O. P., Burdilnaya E. V., Kuznetsov V. V., Bogatyriov K. N. (2020) Online-Identification of Electromagnetic Parameters of an Induction Motor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institution and Power Engineering Associations*, 63 (5), 423–440. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-423-440> (in Russian).
19. Kryvonosov V. E., Vasilenko S. V. (2019) Comparative Analysis of Methods for Calculating the Parameters of Asynchronous Engines for Reference Data. *Österreichisches Multiscience Journal*, 1 (18), 36–42.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-219-227>

UDC 621.396.6

A Detection System with Spider Web Coil-Based Wireless Charging and an Active Battery Management System*

J. Pokorny¹⁾, P. Marcon¹⁾, T. Kriz¹⁾, J. Janousek¹⁾

¹⁾Brno University of Technology (Brno, Czech Republic)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. The article presents a detection system with spider web coil-based wireless charging. Commonly available metal detectors are sold as handheld systems, which enable only progressive, lengthy, time-consuming search. Importantly, a part of the investigated area can thus be easily missed, and the probability that a metal object will not be found increases substantially. This problem, however, is eliminable via the automatic position tracking mode embedded in the solution obtained through our research. The proposed system facilitates using the spider web coil simultaneously for wireless charging and metal detection by pulse induction. The topology of the detector can emit variable pulse lengths, thus allowing the device to detect more types of metal and to adapt itself to the permeability of the soil. The coil has a branch in a relevant part of the winding to reduce undesirable electromagnetic interference during the charging. On the transmitting side of the topology, impedance matching is included to maintain the maximum spatial gap variability. By changing the position of the receiving side, the output voltage changes; therefore, a high efficiency DC/DC converter is employed. The individual battery cells demonstrate different internal resistances, requiring us to apply a new method to balance the cells voltage. The system can be utilized on self-guided vehicles or drones; advantageously, a GPS resending the coordinates to a mesh radio allows for accurate positioning. With the mesh topology, potential cooperation between the multiple systems is possible. The setup utilizes the same coil for wireless power transfer and detection.

Keywords: wireless power transfer, metal detector, power delivery, active battery management system, pulse induction

For citation: Pokorny J., Marcon P., Kriz T., Janousek J. (2021) A Detection System with Spider Web Coil-Based Wireless Charging and an Active Battery Management System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 219–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-219-227>

Система обнаружения с беспроводной зарядкой на основе катушки с крестовидной перемычкой и активной системой управления аккумулятором

Й. Покорный¹⁾, П. Маркон¹⁾, Т. Криз¹⁾, Й. Яноусек¹⁾

¹⁾Технологический университет Брно (Брно, Чешская Республика)

Реферат. В статье представлена система обнаружения с беспроводной зарядкой на основе катушки с крестообразной перемычкой. Обычно доступные металлоискатели продаются

Адрес для переписки

Маркон Петр
Технологический университет Брно
ул. Техническая, 3082/12,
61600, г. Брно, Чешская Республика
Тел.: +420 541-146-281
marcon@vutbr.cz

Address for correspondence

Marcon Petr
Brno University of Technology
3082/12, Technicka str.,
61600, Brno, Czech Republic
Tel.: +420 541-146-281
marcon@vutbr.cz

* The preparation of this paper was assisted by the general student development project in progress at Brno University of Technology.

в виде переносных систем, которые позволяют осуществлять только постепенный, длительный и трудоемкий поиск. Важно отметить, что часть исследуемой зоны, таким образом, может быть легко пропущена, и вероятность того, что металлический объект не будет найден, существенно возрастает. Эта проблема устраняется с помощью автоматического режима отслеживания местоположения, встроенного в решение, полученное в результате наших исследований. Предлагаемая система облегчает одновременное использование катушки с крестообразной перемычкой для беспроводной зарядки и обнаружения металла с помощью импульсной индукции. Топология детектора может излучать переменную длину импульсов, что позволяет устройству обнаруживать больше типов металлов и адаптироваться к проницаемости почвы. Катушка имеет ответвление в соответствующей части обмотки, чтобы уменьшить нежелательные электромагнитные помехи во время зарядки. На передающей стороне топологии включено согласование импеданса для поддержания максимальной изменчивости пространственного зазора. При изменении положения приемной стороны изменяется выходное напряжение, поэтому используется высокоэффективный преобразователь постоянного тока в постоянный. Отдельные элементы батареи демонстрируют различные внутренние сопротивления, что требует применения нового метода для балансировки напряжения элементов. Система может быть использована на самонаводящихся транспортных средствах или беспилотных летательных аппаратах; GPS, успешно отправляющие координаты на многоканальное радио, обеспечивают точное позиционирование. При наличии многоканальной топологии возможно потенциальное сотрудничество между разнообразными системами. В установке используется одна и та же катушка для беспроводной передачи и обнаружения энергии.

Ключевые слова: беспроводная передача питания, металлоискатель, подача питания, активная система управления аккумулятором, импульсная индукция

Для цитирования: Система обнаружения с беспроводной зарядкой на основе катушки с крестовидной перемычкой и активной системой управления аккумулятором / И. Покорный [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 219–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-219-227>

Introduction

Wireless charging has been used for more than a hundred years influencing the development of Tesla transformer. At the present, wireless charging can be used in small electronics to charge electric cars and it is heavily involved in electrical engineering department. There is no use of charging connectors, but the number of components increases. The trend is a resonant or inductive charging. Both methods use different topologies and geometric shapes to transfer the energy. The resonance method carries the possibility of charging up to several tens of centimeters [1, 2], while induction results in higher efficiency and lower interference [3–5].

Pilot's intervention is not necessary as the unmanned aerial vehicle's (UAV) flight path is controlled by the real-time image detection where the variability and a number of various detected waypoints need to be processed. It is possible to perform a completely autonomous flight from take-off of the aircraft to landing [6, 7].

Various speed and altitude may be set during the flight and additional accessories may be controlled by the drone. The use of real-time image detection on an autonomous flight of the UAV can serve for package delivery, mapping of large areas, or for military missions and other security forces [8–12].

System topology

The design of the wireless power transfer and pulse induction detection system consists of transmitting and receiving parts (Fig. 1). The first block of the

transmitting part is a power source for the whole unit. The power source can be realized by an adapter or a power bank that contains standard power delivery and can supply up to 100 W of power. This standard includes the CYPD3135 [13] chip with the CCG3 standard from Cypress which also has a 32-bit ARM processor and can be used as a station monitor.

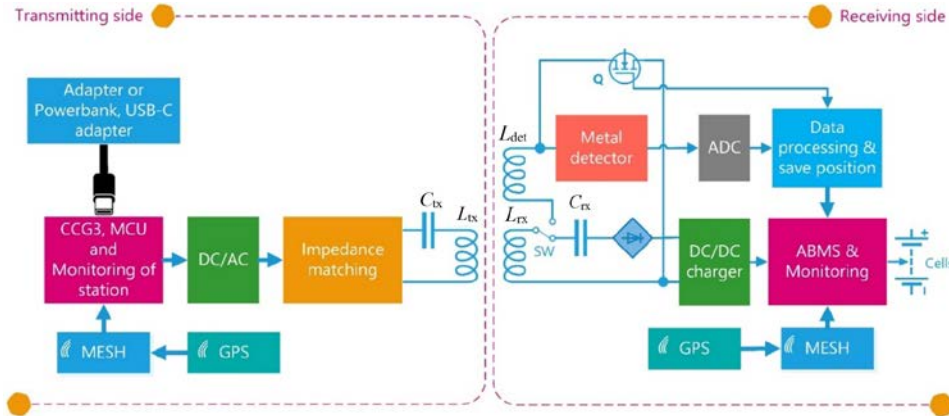


Fig. 1. Topology of the detection and charging system

The chip enables the supply of power to the DC/AC block, which generates an alternating voltage for the serial resonant circuit with transmitting coil L_{tx} and capacitor C_{tx} . The impedance tuning block adjusts the impedance of the transmission resonant circuit L_{tx} and C_{tx} and can improve the transmission efficiency even if the coils are not exactly offset. It also adjusts the mutual inductance M between the coils which is effective by the coupling factor k according to the equation (1) as follows

$$M = k\sqrt{L_{tx}L_{rx}} \text{ [H]}, \quad (1)$$

where L_{rx} – receiving coil.

The mutual inductance in this equation is given only by the coupling factor k , which varies with the distance of the coils and the current consumption of the receiving part. The degree of interaction between the receiving coil L_{rx} and the transmitting coil L_{tx} is a function of the distance and the positional arrangement.

On the receiving side, the coil is realized as a spider web coil with a threaded branch for charging. Part of the coil can be used for charging called L_{rx} or the whole winding $L_{rx} + L_{det}$ can be used for metal detection. The rectifier makes for rectifying the energy. This energy is adjusted to the required voltage to the battery cells by the DC/DC converter. The battery cells are controlled by an active battery management system (ABMS). To suppress the electromagnetic field, an L_{rx} coil with an optimized flowing current according to the charging power is reversed by means of a transistor Q .

For metal detection, the charging system disconnects part of the charging winding L_{rx} and the entire winding L_{det} is used. Then the signal response is processed by the analog-to-digital converter (ADC) part discussed in the next block

diagram, see Fig. 2. The combination of subsequent processing and logging the position saves the data on the charger monitoring. Both parties can have a mesh radio that transmits data to the receiving party. The mesh radio is implemented by the XBEE SX 868 module [14]. The structure of the output data frames depends on the transmission mode. Received data together with coordinates from the navigation module (GPS) can be forwarded to the transmitting party. Then, it is stored via the universal asynchronous receiver-transmitter or serial peripheral interface on a storage device and it can send the coordinates of the detected targets.

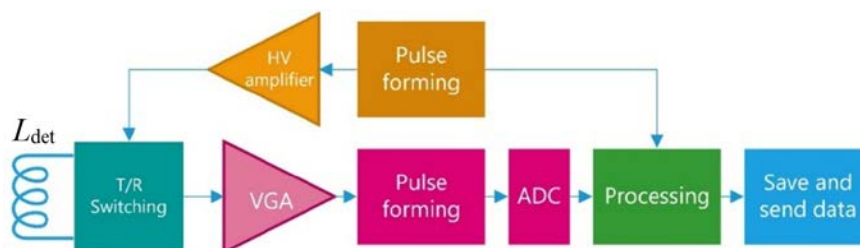


Fig. 2. Block diagram of metal detector

Pulse induction detector topology

The basic topology of the pulse induction metal detector in Fig. 3 is detected by the L_{det} detection coil using formed pulses from the HV 7361 module [15]. The module implements T/R switching with a voltage pulse height of ± 100 V at the current of 2.5 A with the possibility of operating frequency up to 35 MHz. The module also has adjustable switch between reception and transmission using the input logic gates that shape the pulse.

To adjust the received pulse, the AD8331 variable gain amplifier is used for pulse detection and guarantees a dynamic range throughout the amplifying the signal up to 48 dB due to the programmable gain and input resistance setting [16]. The ADL5511 pulse detector [17] can send an envelope of received signal or RMS voltage to the transmitter. Then the signal is further sampled by the ADC 10-bit AD9200 [18] converter with a maximum sampling frequency of 20 Msps. For a conventional embedded system, signal processing is sufficient for the conventional metal detection. For experiments with more complex processing and visualization of more complex structures, it is necessary to use an array of programmable gate arrays. The processed data can be stored on a storage device or sent by the mesh radio together with the coordinates using the ISM band only if an important object is detected or can be sent permanently.

Design of spider web coil

The spider web coil was widely used in older radio receivers on the long waves up to very short waves ($\lambda = 2000$ m to 1 m). Wireless charging works on the similar frequencies. The advantage of this coil is its small parasitic capacity due to the method of winding. Another advantage is the high inductance

achieved by the presence of a large surface area by which it can receive or transmit. The coil design is based on the Archimedean spiral, where the mass point rotates around the z -axis into three-dimensional space at an angular velocity ω and starts from the point at time t [19]. The position of the point relative to the z -axis is then as follows:

$$\begin{aligned} v_x &= v \cos(\omega t) - \omega(vt + c) \sin(\omega t); \\ v_y &= v \sin(\omega t) + \omega(vt + c) \cos(\omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

where $(vt + c)$ – modulus of the position vector of the mass point at time t , from which the velocity components v_x and v_y for the x and y axes are derived.

If we integrate the given equations (2) in parts, their parametric expression are as follows:

$$\begin{aligned} x &= (vt + c) \cos(\omega t); \\ y &= (vt + c) \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

where the point at time t must change sinusoidally.

The coil model is plotted in Fig. 3.

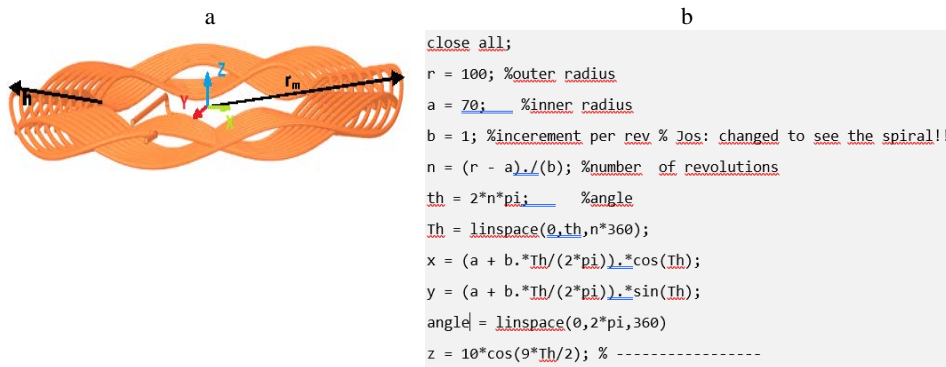


Fig. 3. Spider web coil: a – coil design according to equations (3); b – script for MatLab

Active battery management

It is beneficial to choose ABMS due to the tolerances in the internal resistance or temperature conditions of individual batteries. If an undervoltage occurs on one cell, the balancer disconnects the battery from the load. The advantages of the topology are simplicity and complexity at the expense of the size of the hardware design.

A pair of MOSFETs of Fig. 4 switching the coil is used. The pair is charged from the lower cell for a time given by the inductance of the coil and the voltage of the $Cell_{low}$ cell according to (4)

$$\delta t = L \frac{\delta I}{\delta U} [s], \quad (4)$$

where the length of the MOSFET switching time δt is given by the influence of inductance L and the inductive energy given by the voltage difference δU and

current difference δI . This time is crucial for not exceeding the maximum cell voltage.

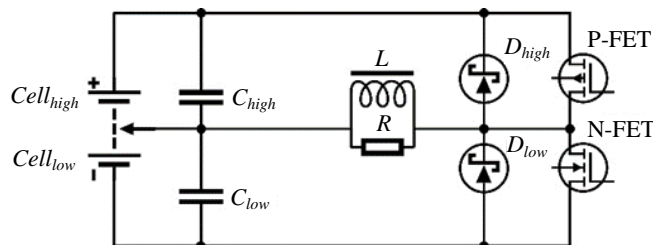


Fig. 4. Balancing between individual cells

During this time, the N-FET must be turned on. In the next cycle, the coil is discharged into the $Cell_{high}$ cell via a parallel D_{high} diode. The same principle can be used for charging a $Cell_{low}$ cell from a P-FET. The gates of the transistors can be controlled by a controller or a PWM regulator according to the voltage of individual cells, but mostly by the capacity of the accumulators, from which the size of the inductor and the length of switching are derived.

Simulations

The theoretical inductance is compared with the actual inductance in Tabl. 1. As expected, the coils of these values have large tolerance (usually 20 %). Theoretical values of the multiple threads differ. The first factor is winding of the threads, and the second factor is neglecting of the supply wires. The coil will have different properties for different frequencies.

Table 1

Comparison of measured and calculated values for the spider web coil

Wire diameter	0.65 mm
Inner radius	120 mm
Outer radius	156 mm
Number of turns for charging	6
Calculated inductance for charging	8.4 μ H
Measured inductance for charging (10 kHz)	10.1 μ H
DC resistance	0.1 Ω
Number of turns for detection	26
Calculated inductance for detection	184.22 μ H
Measured inductance for charging (10 kHz)	154.8 μ H
DC resistance	0.73 Ω

With the entered parameters, the simulation was performed for a step change in voltage (Fig. 5a). There is 1, 5, 10 and 30 μ s of the pulse lengths in the simulation. Fig. 5 visualizes the responses of the coil oscillation due to its parasitic capacity. R_1 forms the series of the winding resistance and C_1 the parasitic capacitance. According to equation (5), the induced voltage on the coil is given by the pulse size of the source V_1 , the ratio of the resistor divider R_1 and R_2 , and the exponential function of the negative pulse t length divided by the transient state of the coil τ

$$u_L(t) = L \frac{\delta i_L}{\delta t} = -V_1 \frac{R_1 + R_2}{R_2} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5)$$

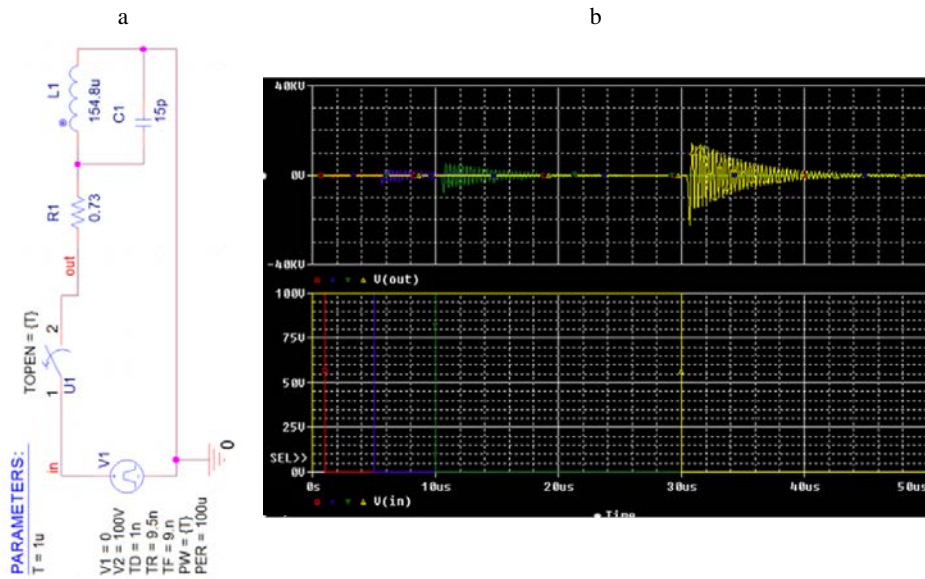


Fig. 5. Coil response without discharge resistance for pulse lengths 1, 5, 10 and 30 μ s:
 a – connection of the coil to the pulse source; b – voltage peak when opening switch U_1

By adding the resistor R_2 in the diagram in Fig. 6a, which simulates the input impedance of the HV7360 module [14], the parasitic capacitance of capacitor C_1 to R_2 is not applied and the voltage peak is induced due to the very fast current dissipation by the coil L_1 . The exact value can be determined accordingly to the equation (5), where τ is the time constant.

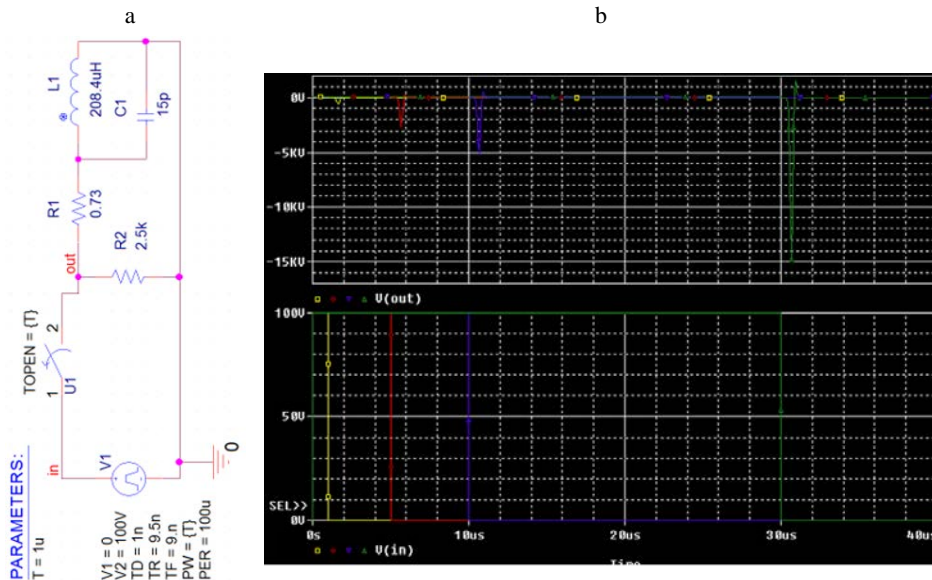


Fig. 6. Coil response with discharge resistance for pulse lengths 1, 5, 10 and 30 μ s:
 a – adding impedance; b – overvoltage peak on the coil without oscillations

Simulation for recharging the cell

For a Li-Ion cell with a capacity of 2500 mAh with a nominal voltage of 3.7 V, the switching time for charging an inductor of 15 μH is equal by the equation (4). Equation (6) provides a calculation of the switching time of transistors δt for a specified Li-Ion cell

$$\delta t = L \frac{\delta I}{\delta U_{Cell_{high}}} = 15 \cdot 10^{-6} \frac{2.5}{3.7} = 10.13 \mu s. \quad (6)$$

The discharge time in equation (7) is slightly shorter due to the higher voltage drop across the Schottky diode. To improve power transfer efficiency, the power MOSFET is in parallel with an open Schottky diode on at 8.92 μs

$$\delta t = L \frac{\delta I}{\delta (U_{Cell_{high}} + U_{D_{high}})} = 15 \cdot 10^{-6} \frac{2.5}{3.7 + 0.5} = 8.92 \mu s. \quad (7)$$

For given calculation, the scheme from Fig. 4 in P-spice was performed followed by the time analysis for the course of the voltage on the $Cell_{high}$. In the connection, the cells represent resistors R_5 and R_6 because the ideal batteries hold a constant voltage; thereby, it represents an ideal voltage source. The pulse source has parameters according to equation (4). The bottom graph in Fig. 7 shows the voltage peak from 95 mV coil as a result of the mean value of the voltage on the $Cell_{high}$ increases by 220 μV and periodizes at 160 μV from 150 μs until the balancing stops and the $Cell_{high}$ voltage is equal to $Cell_{low}$.

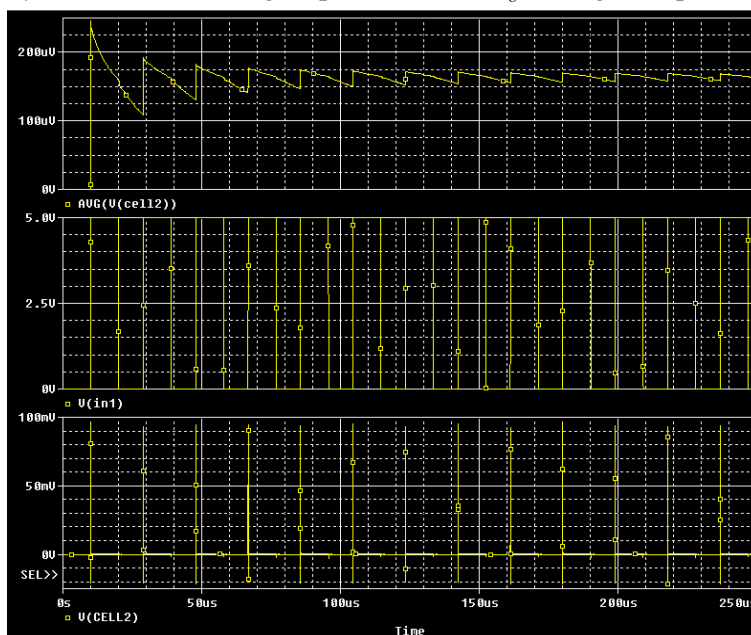


Fig. 7. Voltage increase on $Cell_{high}$ at switching time $t = 10 \mu s$ of N-FET transistor

CONCLUSION

The article describes a proposed topology that allows wireless charging without the need for the precise centering due to the fine tuning with the use of

the impedance matching which is not addressed in this article. The proposed charging via the USB-C connector allows charging with the use of standardized adapters or power banks. A coil winding like spider web coil also allows the detection of various objects according to the settings and processing of the amount of pulse energy. The active balancing system makes it possible to transfer the energy between adjacent cells in the event of different internal resistance and thus use their full capacity. Advantageously, it can be used for an autonomous system for easy charging and detection of metal objects.

REFERENCES

1. Valtchev S., Valtchev S. (2019) Control for the Contactless Series Resonant Energy Converter. *Emerging Capabilities and Applications of Wireless Power Transfer*, 102–140. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5870-5.ch005>.
2. Valtchev S., Medeiros R., Valtchev S., Klaassens B. (2011) An Instantaneous Regulation for the Wired and Wireless Super-Resonant Converters. *IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/intlec.2011.6099875>.
3. Gigov G., Krusteva A., Valtchev S. (2016) Experimental Study of Wireless Inductive System for Electric Vehicles Batteries Charging. *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 290. <https://doi.org/10.1109/epepmc.2016.7752012>.
4. *Electronics World* (1920). New York: Ziff-Davis Publishing Company. 998.
5. Mahmood M. F., Mohammed S. L., Gharghan S. K., Al-Naji A., Chahl J. (2020) Hybrid Coils-Based Wireless Power Transfer for Intelligent Sensors. *Sensors*, 20 (9), 2549. <https://doi.org/10.3390/s20092549>.
6. Gabrlik P., Jelinek A., Janata P. (2016) Precise Multi-Sensor Georeferencing System for Micro UAVs. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (25), 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.029>.
7. Gabrlik P. (2015) The Use of Direct Georeferencing in Aerial Photogrammetry with Micro UAV. *IFAC-PapersOnLine*, 48 (4), 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.064>.
8. Janousek J., Marcon P., Pokorny J., Mikulka J. (2019) Detection and Tracking of Moving UAVs. *Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring)*, 2759–2763. <https://doi.org/10.1109/piers-spring46901.2019.9017351>.
9. Pokorny J., Marcon P., Janousek J., Kriz T., Dohnal P. (2019) A Wireless Charging Station for Multipurpose Electronic Systems. *Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring)*, 2093–2097. <https://doi.org/10.1109/piers-spring46901.2019.9017278>.
10. Grechikhin L. I., Saharuk D. A., Sivashko A. B., Tsanova A. A. (2010) Energy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Windmill (Theory, Streamlined Airflow). *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 59–68 (in Russian).
11. Lukovnikov V. I., Rudchenko Y. A., Samovendyuk N. V. (2011) Determination of Small Parameter of Auto-Oscillating “Single-Phase Asynchronous Motor – Linear Elastic Element System”. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 5–9 (in Russian).
12. Dedek J., Golembiovsky M., Slanina Z. (2017) Sensoric System for Navigation of Swarm Robotics Platform. *18th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 429–433. <https://doi.org/10.1109/carpathiancc.2017.7970438>.
13. *EZ-PD™ CCG3, USB Type-C Port Controller*. Available at: <https://www.cypress.com/file/222281/download>.
14. *Digi XBEE SX 868 Modul*. Available at: <https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/xf-modules/sub-1-ghz-rf-modules/digi-xbee-sx-868>.
15. *High-Speed ±100V 2.5A Two-or-Three-Level Ultrasound Pulsers*. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005570A.pdf>.
16. *Ultralow Noise VGAs with Preamplifier and Programmable RIN*. Available at: <https://manualzz.com/doc/7930643/ultralow-noise-vgas-with-preamplifier-and-programmable-rin>.
17. *Complete 10-Bit, 20 MSPS, 80 mW CMOS A/D Converter*. Available at: <https://manualzz.com/doc/13384652/a-complete-10-bit--20-mbps--80-mw-cmos-a-d-converter-ad9200>.
18. *DC to 6 GHz Envelope and TruPwr RMS Detector*. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5511.pdf>.
19. Line Mathematics. *Britannica*. Available at: <https://www.britannica.com/science/line-mathematics>.

Received: 21 October 2020

Accepted: 18 February 2021

Published online: 31 May 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-228-238>

УДК 621.316.37.064.1

Исследование возникновения резонанса при воздействии динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок

Я. В. Потачиц¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рост уровней токов короткого замыкания в энергосистеме Республики Беларусь требует исследования параметров электродинамической стойкости основных конструктивных элементов электроустановок с гибкими проводниками. В режиме короткого замыкания по проводникам электроустановок протекают токи, в сотни раз превышающие токи рабочего режима. При взаимодействии магнитных полей, образованных этими токами, возникают значительные электромагнитные усилия, оказывающие разрушающее воздействие как на сами токоведущие части, так и на конструктивные элементы электроустановок: опорные изоляторы, коммутационные аппараты, измерительную аппаратуру. Движение проводов в режиме короткого замыкания приводит к появлению в них существенных динамических нагрузок, которые, в свою очередь, передаются на порталы, опорные изоляторы и электрические аппараты. Актуальной проблемой является возникновение в основных конструктивных элементах недопустимых механических усилий, способных вызвать их разрушение. Так, анализ физико-механических параметров и геометрических размеров гибкой ошиновки распределительных устройств показывает, что нарушение условия электродинамической стойкости по тяжению маловероятно в силу высокой механической прочности применяемых сталеалюминевых проводов большого сечения. Вместе с тем ограничивающие пролет порталы, опорные изоляторы и другие электрические аппараты имеют значительно меньшие допустимые изгибающие нагрузки. При воздействии динамических усилий проводники изгибаются и передают нагрузку на конструктивные элементы, которые обладают определенной упругостью. Таким образом, достоверное определение динамических нагрузок с учетом действующих на опорные конструкции токоведущих частей возможно лишь при постановке динамической задачи. В статье излагаются методы математического моделирования и вычислительного эксперимента для анализа параметров электродинамической стойкости основных конструктивных элементов, которые определяются с помощью коэффициентов, зависящих от собственных частот колебаний и характера изменения динамических усилий во времени. Для решения поставленных задач составлены математические модели, сформулированы краевые задачи расчета электродинамической стойкости конструктивных элементов с учетом вероятного совпадения частот вынужденных и собственных колебаний конструктивных элементов.

Ключевые слова: гибкие проводники, опорные конструкции, коммутационные аппараты, свободные колебания, вынужденные колебания, динамические усилия

Для цитирования: Потачиц, Я. В. Исследование возникновения резонанса при воздействии динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок / Я. В. Потачиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 228–238. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-228-238>

Адрес для переписки

Потачиц Ярослав Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
PotachitsYaroslav@bntu.by

Address for correspondence

Potachits Yaroslav V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
PotachitsYaroslav@bntu.by

A Study of the Occurrence of Resonance under the Influence of Dynamic Forces on the Structural Elements of Electrical Installations

Y. V. Potachits¹⁾

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

Abstract. The increase in the levels of short-circuit currents in the power system of the Republic of Belarus requires the study of the parameters of the electrodynamic stability of the main structural elements of electrical installations with flexible conductors. In case of a short circuit in the network, currents tenfold exceeding the rated one hundreds of times can flow through the current-carrying part of the device. When the magnetic fields formed by these currents interact, significant electromagnetic forces arise, which have a destructive effect both on the current-carrying parts themselves and on the structural elements of electrical installations, viz. support insulators, switching devices, measuring equipment. The movement of the wires in a short-circuit mode leads to the appearance of significant dynamic loads in them, which, in turn, are transmitted to the portals, support insulators and electrical devices. A topical problem is the occurrence of unacceptable mechanical forces in the main structural elements that can cause their destruction. Thus, the analysis of the physical and mechanical parameters and geometric dimensions of the flexible busbar of switchgear shows that a violation of the condition of electrodynamic resistance to tension is unlikely due to the high mechanical strength of the large-section steel-aluminum wires used. At the same time, span-limiting portals, support insulators and other electrical devices have significantly lower permissible bending loads. When exposed to dynamic forces, the conductors bend and transfer the load to the structural elements which have certain elasticity. Thus, a reliable determination of dynamic loads, taking into account the current-carrying parts acting on the supporting structures, is possible only if a dynamic task is set. The article describes the methods of mathematical modeling and computational experiment for analyzing the parameters of the electrodynamic stability of the main structural elements which are determined using coefficients that depend on the natural frequencies of oscillations and the nature of changes in dynamic forces over time. To solve these problems, mathematical models are compiled and boundary value problems are formulated for calculating the electrodynamic stability of structural elements, taking into account the possible coincidence of the frequencies of natural and forced oscillations of structural elements taking into account the probable coincidence of the frequencies of forced and natural vibrations of structural elements.

Keywords: flexible conductors, supporting structures, switching devices, free oscillations, forced oscillations, dynamic forces

For citation: Potachits Y. V. (2021) A Study of the Occurrence of Resonance under the Influence of Dynamic Forces on the Structural Elements of Electrical Installations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 228–238. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-228-238> (in Russian)

Введение

Динамические усилия при коротком замыкании (КЗ) опасны для опорных конструкций и аппаратов распределительных устройств из-за их недостаточной механической прочности. Например, в соответствии с типовыми проектными материалами института «Энергосетьпроект», допустимые изгибающие нагрузки от гибких проводников 110 кВ на электрические аппараты не должны превышать 100–200 даН. Условие механической прочности для гибких проводников открытых распределительных устройств (ОРУ) записывается в следующем виде [1]:

$$P_{\max i} \leq P_{\text{доп}i}, \quad i = x, y, z, \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальная расчетная нагрузка на аппараты и изоляторы, даН; $P_{\text{доп}}$ – допустимая изгибающая нагрузка аппаратов и изоляторов, даН.

Максимальные тяжения при КЗ являются импульсными ударными нагрузками [2], результат действия которых на опорные конструкции и электрические аппараты может быть установлен лишь с учетом влияния их инерционных и упругих характеристик, что следует учитывать при проверке механической прочности.

Основная часть

Провода вместе с конструктивными элементами ОРУ образуют единую колебательную систему (рис. 1), поэтому уравнения движения токоведущих частей и аппаратов ОРУ должны решаться совместно [2]. При математической постановке задачи применяется принцип связей механики, т. е. действие проводников на электрические аппараты заменяется реакциями связей. По отношению к изоляторам провода являются внешними силами. Упругая податливость опорных изоляторов обусловлена собственной податливостью, деформациями несущих конструкций, подвижностью болтовых соединений, наличием эластичных прокладок под фланцами и др. [3].

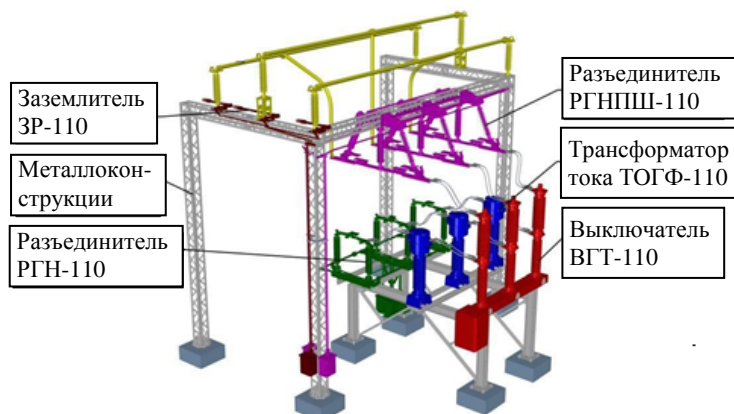


Рис. 1. Компактный модуль для открытого распределительного устройства 110–220 кВ

Fig. 1. Compact module for the 110–220 kV switchgear

Гибкие проводники представляются гибкой упругой нитью, динамика которой при КЗ описывается уравнением движения в векторно-параметрической форме [1]

$$T \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial S} \frac{\partial \bar{R}}{\partial S} + \bar{f} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где T – динамическое тяжение провода, Н; \bar{R} – мгновенное значение радиус-вектора, описывающего пространственное расположение провода, м; \bar{f} – вектор удельного электродинамического усилия, действующего на единицу длины провода, Н/м; ρ – масса единицы длины провода, кг/м.

Стержневые опорные изоляторы, применяемые в ОРУ 110 кВ и выше, представляются консольными стержнями с распределенной массой и постоянной жесткостью по высоте изолятора. При этом с одного конца изолятор жестко зашпелен, а с другого подвергается действию динамических усилий, обусловленных тяжениями в проводах (рис. 2, где H – высота изолятора; h_1 – высота верхнего фланца; h_2 – то же нижнего фланца; D – наибольший диаметр изоляционной части). Если не учитывать соединительные фланцы, можно считать, что упругие стержни имеют равномерно распределенную массу [4].

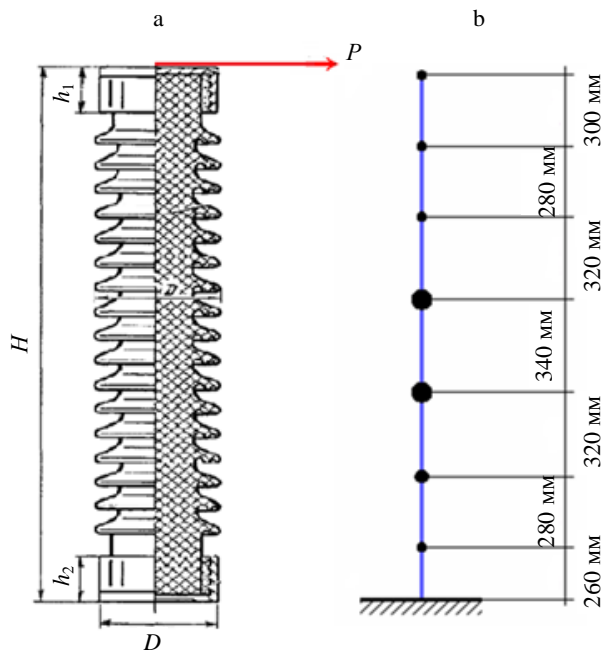


Рис. 2. Модель изолятора марки ИОС-110-600:
а – конструктивное исполнение; б – расчетная схема

Fig. 2. A model of an ISC-110-600 insulator:
a – constructive version; b – calculation scheme

В общем случае на опорные изоляторы действуют силы, равные [1]

$$\bar{P}_i = \sum_{i=1}^n \bar{T}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где \bar{T}_i – векторы тяжения в точках крепления провода к изоляторам.

При воздействии динамических сил опорный изолятор испытывает вынужденные изгибающие колебания. Деление на отрезки по высоте изолятора обусловлено необходимостью определить характерные сечения, в которых будут наблюдаться наибольшие величины перерезывающих сил и моментов (рис. 3).

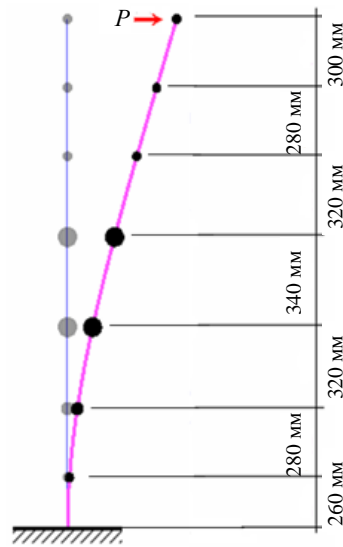


Рис. 3. Воздействие динамической силы на опорный изолятор

Fig. 3. Impact of the dynamic force on the support insulator

Вынужденными продольными колебаниями, вызванными составляющими динамической силы вдоль изолятора, пренебрегаем, так как упругая податливость изоляторов в этом направлении незначительна [5]. Для выбранной расчетной модели вынужденные поперечные колебания опорных изоляторов без учета затухания, влияния инерции вращения и поперечной силы представляются в виде ряда [4]

$$R_i = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} X_j, \quad i = x, y; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где n – количество учитываемых частот собственных колебаний изолятора; φ_{ij} – функции времени; X_j – нормальные функции, соответствующие условиям закрепления на концах колеблющегося стержня.

Для принятой расчетной модели опорного изолятора в виде консоли нормальные функции имеют вид [3]

$$X_j = \operatorname{ch} k_j z' - \cos k_j z' - \alpha_i (\operatorname{sh} k_j z' - \sin k_j z'), \quad (5)$$

где k_j – параметры собственных частот колебаний опорного изолятора, определяются как

$$k_j = \operatorname{ch} k_j l \cos k_j l = -1; \quad (6)$$

l – длина изолятора; z' – текущая координата по длине изолятора, $z' = l - z$; α_i – коэффициенты, рассчитываемые по значениям корней частотного уравнения из выражения

$$\alpha_i = \frac{\cos k_j l + \operatorname{ch} k_j l}{\sin k_j l + \operatorname{sh} k_j l}. \quad (7)$$

Функции времени φ_{ij} определяются из уравнения [3]

$$\frac{d^2 \varphi_{ij}}{dt^2} + \omega_j^2 \varphi_{ij} = \frac{2P_i}{ml} (-1)^{j+1}, \quad i = x, y, \quad (8)$$

где ω_j – угловые частоты последовательных форм колебаний, определяемые как

$$\omega_j^2 = \frac{EJ}{m} k_j^4; \quad (9)$$

EJ – изгибная жесткость опорного изолятора; m – масса единицы длины изолятора, рад/с².

Математическая модель динамики опорного изолятора представлена в общем виде и актуальна вне зависимости от изменений динамических усилий. Она проверена по аналитическому решению задачи, полученному для синусоидальной силы [4]. Для определения перерезывающих сил и моментов с погрешностью, не превышающей 3 %, следует учитывать минимум 11 гармоник ряда (4) [6].

В ходе выполнения исследования в качестве примера произведен расчет собственной частоты колебаний опорного изолятора марки ИОС-110-600, паспортные данные которого приведены в табл. 1. Параметры изолятора приняты в соответствии с конструктивными чертежами.

Таблица 1

Параметры опорного изолятора марки ИОС-110-600
Parameters of the reference insulator of the brand IOS-110-600

Тип изолятора	Номинальное напряжение, кВ	Минимальная разрушающая нагрузка на изгиб, даН	Масса, кг	Высота изолятора H , мм	Наибольший диаметр изоляционной части D , мм	Высота фланца, мм	
						верхнего h_1	нижнего h_2
ИОС-110-600	110	600	71	2100	225	94	94

Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР [7], позволяющего определить не только численные значения гармоник собственных колебаний, но и их форму. Значения частот собственных колебаний для опорного изолятора марки ИОС-110-600 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Частоты собственных колебаний изолятора марки ИОС-110-600
Natural oscillation frequencies of the insulator of the brand IOS-110-60

Номер гармоники	Частота, рад/с	Частота, Гц	Период, с
1	0,137039	0,0218104	45,8497000
2	0,690178	0,109845	9,1037200
3	2,013330	0,320432	3,1207900
4	4,147060	0,660025	1,5151000
5	5,841330	0,929676	1,0756400
6	9,523090	1,515650	0,6597850
7	11,794900	1,877210	0,5327050
8	14,288500	2,274080	0,4397380
9	27,195900	4,328370	0,2310340
10	41,146500	6,548670	0,1527030
11	53,914200	8,580720	0,1165400
12	73,649500	11,721700	0,0853120
13	89,879000	14,304700	0,0699071
14	108,185000	17,218100	0,0580783

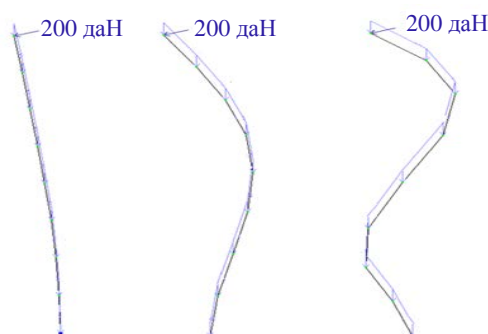


Рис. 4. Первые три собственные формы колебаний изолятора

Fig. 4. The first three natural waveforms of the insulator

Экспериментально доказано, что упругая система с распределенными параметрами и малым демпфированием при гармоническом возбуждении испытывает резонансные колебания на некоторых явно выраженных характерных частотах [8]. Каждой такой резонансной или собственной частоте соответствует собственная или нормальная форма распределения амплитуд колебаний изолятора. Первые три собственные формы колебаний изолятора (рис. 4) и связанные с ними частоты определяются геометрической формой и размерами самого изолятора, не зависят от внешних нагрузок и являются весьма важными динамическими характеристиками распределения его инерционных и жесткостных свойств [6].

Собственные колебания возникают в изолированной системе вследствие внешнего воздействия, вызывающего у точек системы начальные отклонения от положения равновесия [9]. После удаления внешнего воздействия движение системы происходит благодаря наличию внутренних упругих сил, восстанавливающих равновесие [4].

Согласно [2], при совпадении частот собственных колебаний конструктивных элементов ОРУ с частотой воздействующего динамического тяжения возможно двукратное увеличение перерезывающих сил и моментов по сравнению с амплитудой приложенного тяжения. Следовательно, для анализа электродинамической стойкости необходимо провести частотный анализ вынужденных колебаний. В качестве их возбудителя в данном случае выступают подвижные элементы конструкции – токоведущие части открытого распределительного устройства. С помощью разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ компьютерной программы FLEBUS 2.0 получены характерные осциллограммы динамических усилий в результате моделирования двухфазного КЗ величиной 30 кА в ячейке типового ОРУ 110 кВ (рис. 5).

На рис. 5 цифрой 1 обозначены кривые тяжения фазы В, С. Остальные кривые являются результатом частичной интерполяции и на определенных промежутках приблизительно описывают начальный график.

Особый интерес представляет кривая 5 (рис. 5), так как именно она на промежутке 0,53–0,70 с совпадает с характерным максимумом тяжения, принятым в качестве расчетного усилия на изолятор. Согласно графикам, величина этого усилия составляет 200 даН.

С помощью программы Advanced Grapher [10] методом регрессивного анализа получена функция, описывающая кривую 5 динамических усилий:

$$f(x) = (7,36 \cdot 10^8)x^6 + (2,71 \cdot 10^9)x^5 - (4,12 \cdot 10^9)x^4 + (3,34 \cdot 10^9)x^3 - (1,51 \cdot 10^9)x^2 + (3,71 \cdot 10^8)x - (3,72 \cdot 10^7). \quad (10)$$

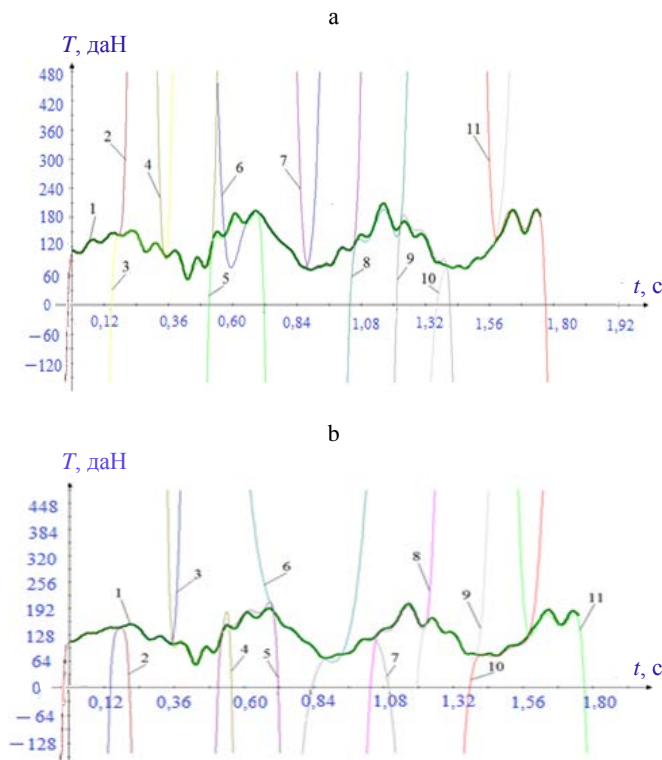


Рис. 5. Графики динамических тяжений: а – фазы В; б – фазы С

Fig. 5. Graph of the dynamic tensions: a – phase B; b – phase C

Для частотного анализа данной функции разложим ее в ряд Фурье [11]:

$$f(x) = \frac{a_0}{T} + \sum a_n \cos\left(\frac{\pi n x}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{\pi n x}{T}\right);$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) dx;$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) \cos\left(\frac{\pi n x}{T}\right) dx;$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) \sin\left(\frac{\pi n x}{T}\right) dx,$$
(11)

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – количество учитываемых гармоник.

При $T = 0,17$; $a_0 = \frac{1}{0,17} \int_{0,53}^{0,7} f(x) dx = 7678283,65$ получим:

$$a_n = \left\{ 1,4286\pi^5 n^5 \left[12403311,2(-1)^n - 180810000 \right] + \right.$$

$$\left. + 1,4286\pi^3 n^3 \left[21551376,0(-1)^n + 4811604000 \right] - \right.$$
(12)

$$-1,4286\pi n \left[5522914656,0(-1)^n + 38118276000 \right] / (\pi^7 n^7);$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) \sin\left(\frac{\pi n x}{T}\right) dx = 0.$$

Окончательно ряд для первых одиннадцати членов имеет вид

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos 18,47x + a_2 \cos 36,94x + a_3 \cos 55,41x + a_4 \cos 73,88x + \\ + a_5 \cos 92,35x + a_6 \cos 110,82x + a_7 \cos 129,29x + a_8 \cos 147,76x + \quad (13) \\ + a_9 \cos 166,23x + a_{10} \cos 184,71x + a_{11} \cos 203,17x \dots + a_n \cos\left(\frac{\pi n x}{T}\right).$$

Значения частот вынужденных колебаний представлены в табл. 3

Таблица 3

Частоты вынужденных колебаний
Frequencies of forced oscillations

Номер гармоники	Частота, рад/с	Частота, Гц	Период, с
1	18,47	2,9411	0,3401
2	36,94	5,8821	0,1701
3	55,41	8,8232	0,1133
4	73,88	11,7643	0,0850
5	92,35	14,7054	0,0680
6	110,82	17,6464	0,0566
7	129,29	20,5875	0,0485
8	147,76	23,5286	0,0425
9	166,23	26,4697	0,0377
10	184,71	29,4124	0,0339
11	203,17	32,3519	0,0309

Из данных из табл. 2, 3 видно, что некоторые частоты гармоник вынужденных колебаний близки к значениям собственных частот колебаний опорного изолятора, т. е. рассматриваемая система потенциально может войти в резонанс, следовательно величины перерезывающих сил и моментов будут больше допустимых, что может привести к возникновению опасных механических напряжений в материале корпуса изолятора и его разрушению.

Подводя итог, можно заключить, что при выполнении динамического расчета надлежит обязательно определять частоты свободных колебаний и проводить их сравнение с частотами вынуждающих сил [12]. Рекомендуется, чтобы частота свободных колебаний была больше частоты вынужденных колебаний. В большинстве случаев нельзя добиться изменения частот вынужденных колебаний, следовательно, необходимо изменять частоты свободных колебаний. Как показал вычислительный эксперимент, на величину частот собственных колебаний конструктивных элементов можно

влиять путем изменения их механических и геометрических параметров [13]. Например, частота собственных колебаний опорного изолятора возрастает при увеличении жесткости материала корпуса или уменьшении высоты изолятора.

ВЫВОДЫ

1. Разработан численный метод расчета электродинамической стойкости конструктивных элементов распределительных устройств, в котором гибкие проводники вместе с опорными конструкциями рассматриваются как единая колебательная система при коротком замыкании. Достоверность расчетов подтверждена сравнением их результатов с опытными данными. Выполнен частотный анализ собственных и вынужденных колебаний конструктивных элементов распределительных устройств.

2. Поставлен вычислительный эксперимент по оценке влияния механических и геометрических параметров конструктивных элементов на параметры электродинамической стойкости. Подтверждена возможность наступления резонанса при совпадении частот вынужденных и собственных колебаний.

3. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании электроустановок с гибкими проводами. Предложены рекомендации по увеличению частоты собственных колебаний конструктивных элементов распределительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., перераб. и доп. М., 2007. 512 с.
2. Сергей, И. И. Динамика гибких проводов электроустановок энергосистем: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей. Минск, 2002. 324 л.
3. Долин, А. П. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой / А. П. Долин, Г. Ф. Шонгин. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
4. Писаренко, Г. С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материала / Г. С. Писаренко. Киев: Наукова думка, 1970. 379 с.
5. Строительная механика / А. А. Поляков, Ф. Г. Лялина, Р. Г. Игнатов; под общ. ред. А. А. Полякова. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 424 с.
6. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. М.: Наука, 1976. 607 с.
7. Программный комплекс ЛИРА-САПР-2013 / под ред. А. С. Городецкого. К.; М.: Электрон. изд., 2013. 376 с.
8. Сергей, И. И. Оценка эффективности устройства ограничения тяжёлых проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Я. В. Потачиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 309–319. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319>.
9. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учетом конструктивных элементов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.

10. Евстегнеева, А. С. Использование компьютерной программы Advanced Grapher как средство реализации принципа наглядности в процессе обучения математике / А. С. Евстегнеева // Молодой ученый. 2018. № 2. С. 108–112.
11. Романова, Л. Д. Интегральные преобразования / Л. Д. Романова, Т. А. Шаркунова, Т. В. Елисеева. Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. 80 с.
12. Сергей, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 252 с.
13. Совершенствование методов расчета электродинамической стойкости электроустановок с гибкими проводниками с учетом влияния конструктивных элементов: отчет о НИР (заключит.) / БНТУ; рук. Е. Г. Пономаренко; исполн.: П. И. Климович, А. Г. Баран, Я. В. Потачиц, А. А. Васильева, Е. К. Башаркевич, В. В. Журкевич. № ГР 20191009. Минск, 2020. 70 с.

Поступила 02.02.2021 Подписана в печать 06.04.2021 Опубликовано онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. *Rules for the Installation of Electrical Equipment*. 7th ed. Moscow, 2007 (in Russian).
2. Sergei I. I. (2002) *Dynamics of Flexible Wires of Electrical Installations of Power Systems: Theory and Computational Experiment*. Minsk. 324 (in Russian).
3. Dolin A. P., Shongin G. F. (1988) *Open Switchgear with Rigid Busbar*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 192 (in Russian).
4. Pisarenko G. S. (1970) *Vibrations of Mechanical Systems Taking into Account the Imperfect Elasticity of the Material*. Kiev, Naukova dumka Publ. 379 (in Russian).
5. Polyakov A. A., Lyalina F. G., Ignatov R. G. (2014) *Construction Mechanics*. Ekaterinburg, Ural Federal University. 424 (in Russian).
6. Belyaev N. M. (1976) *Resistance of Materials*. Moscow, Nauka Publ. 607 (in Russian).
7. Gorodetskii D. A., Barabash M. S., Vodop'yanov R. Yu., Titok V. P., Artamonova A. E. (2013) *LIRA-CAD-2013 Software Package*. Kiev; Moscow, Elektronnoe izdanie Publ. 376 (in Russian).
8. Sergey I. I., Panamarenka E. G., Potachits Ya. V. (2017) Evaluation of the Efficiency of the Device for Limiting Tension of the Wire in a Short Circuit. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 309–319. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319> (in Russian).
9. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when a Concentrated Load is Being Replaced with a Distributed One Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234> (in Russian).
10. Evstegneeva A. S. (2018) Using the Advanced Grapher Computer Program as a Means of Implementing the Principle of Visibility in the Process of Teaching Mathematics. *Molodoi Uchenyi [Young Scientist]*, (2), 108–112 (in Russian).
11. Romanova L. D., Sharkunova T. A., Eliseeva T. V. (2015) *Integral Transformations*. Penza, Penza State University Publ. 80 (in Russian).
12. Sergei I. I., Strelyuk M. I. (1999) *Dynamics of Wires of Electrical Installations of Power Systems under Short Circuits: Theory and Computational Experiment*. Minsk, VUZ-YUNITI Publ. 252 (in Russian).
13. Panamarenka E. G., Klimkovich P. I., Baran A. G., Potachits Ya. V., Vasil'eva A. A., Basharkevich E. K., Zhurkevich V. V. (2020) *Improvement of Methods for Calculating the Electrodynamical Stability of Electrical Installations with Flexible Conductors Taking into Account the Influence of Structural Elements: Research Project Report (Final)*. Number of State Registration GR 20191009. Minsk, BNTU. 70 (in Russian).

Received: 2 February 2021

Accepted: 6 April 2021

Published online: 31 May 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249>

УДК 621.316

Взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий

В. П. Счастный¹⁾, А. И. Жуковский²⁾

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

²⁾ЧУП «КРМ Инжиниринг» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Экономичность системы электроснабжения предприятия зависит от качества электрической энергии и ее потерь в электрических сетях, в значительной степени определяемых режимами регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Зачастую на практике задачи регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий, включающих электрические сети напряжением до 1 кВ, а также 6, 10 кВ и выше, решаются раздельно. Это ведет к нерациональному использованию имеющихся устройств регулирования напряжения, недоиспользованию установленной мощности компенсирующих устройств, оказывает влияние на регулирование напряжения в электрических сетях энергоснабжающей организации. Поскольку указанные режимы нераздельно связаны, правильно их определить можно лишь с использованием комплексного подхода, основанного на технико-экономических критериях и учитывающего технические требования и местные условия. В настоящей статье анализируется взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий с точки зрения обеспечения качества электроэнергии и минимизации нагрузочных потерь мощности. Представлены методики и результаты расчетов (на примере конкретного промышленного объекта) по определению отклонений и потерь напряжения в электрической сети и выбору параметров регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Вследствие тесной взаимосвязи указанных режимов, затрагивающей все уровни напряжения, эффективность мероприятий невозможно обеспечить без использования многофункциональных устройств управления оборудованием трансформаторных подстанций.

Ключевые слова: электрическая сеть, трансформаторная подстанция, регулирование напряжения, компенсация реактивной мощности

Для цитирования: Счастный, В. П. Взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / В. П. Счастный, А. И. Жуковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 239–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249>

Адрес для переписки

Счастный Валерий Петрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
val.sc@mail.ru

Address for correspondence

Schasny Valery P.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
val.sc@mail.ru

On the Mutual Influence of Voltage Control Modes and the Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises

V. P. Schasny¹⁾, A. I. Zhukouski²⁾

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

²⁾PUE "KRM Engineering" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The efficiency of an enterprise's power supply system depends on the quality of electricity and the losses of the latter in electrical networks; both being largely determined by the modes of voltage control and reactive power compensation. In practice, the problems of voltage control and reactive power compensation in power supply systems of industrial enterprises, including electric networks with a voltage of up to 1 kV, as well as 6, 10 kV and higher, are often solved separately. It triggers an irrational use of existing voltage control devices, underutilization of the installed capacity of compensating devices, and affects the voltage control in the electrical networks of the power supply organization. Since voltage management and compensation modes of reactive power are inseparable, they can be correctly determined only with the use of an integrated approach based on technical and economic criteria and taking into account technical requirements and local conditions. This article analyzes the mutual influence of voltage control and reactive power compensation modes in the electrical networks of industrial enterprises from the point of view of ensuring the quality of electricity and minimizing load power losses. The method and results of calculations (on the example of a specific industrial facility) for determining voltage deviations and losses in the electrical network as well as for selecting parameters for voltage control and reactive power compensation are presented. Due to the close relationship of these modes that affect all voltage levels, the effectiveness of measures cannot be ensured without the use of multifunctional devices for controlling the equipment of transformer substations.

Keywords: electric network, transformer substation, voltage control, reactive power compensation

For citation: Schasny V. P., Zhukouski A. I. (2021) On the Mutual Influence of Voltage Control Modes and the Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 239–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249> (in Russian)

Введение

С введением в эксплуатацию генерирующих мощностей Белорусской АЭС и ее интеграцией в баланс энергосистемы ожидаются изменения в структуре электропотребления, обусловленные увеличением объемов потребления электроэнергии промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, электрифицированным железнодорожным и городским транспортом. Рост электропотребления, в свою очередь, требует повышения пропускной способности электрических сетей, т. е. увеличения максимально допустимых величин мощности, которые могут быть переданы потребителям с учетом условий эксплуатации, норм качества электрической энергии и параметров надежности функционирования энергосистемы.

В рамках Отраслевой программы развития электроэнергетики на 2016–2020 гг. реализованы масштабные проекты строительства и реконструкции электрических сетей и подстанций энергосистемы. При этом рост электропотребления промышленных предприятий требует увеличения про-

пусковой способности их собственных сетей за счет модернизации систем электроснабжения [1–2].

Подходы к решению проблемы

Принимая решения по модернизации систем электроснабжения промышленных предприятий, в первую очередь нужно рассматривать возможности повышения пропускной способности электрических сетей и регулирования напряжения, предоставляемые компенсацией реактивной мощности (КРМ) при использовании компенсирующих устройств различных типов. Следует заметить, что вследствие многолетнего отсутствия в Беларуси платы за реактивную энергию (главный экономический рычаг стимулирования КРМ) эффективность ее компенсации на большинстве промышленных предприятий крайне низкая.

Для нормальной работы электроприемников в различных режимах нагрузки на их выводах должны поддерживаться нормированные уровни напряжения путем встречного регулирования напряжения в центрах питания. В настоящее время это обеспечивается лишь на шинах 6, 10 кВ подстанций 110/35/10(6) кВ, оборудованных трансформаторами с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), при условии, что последние работают нормально. Технических средств для встречного регулирования напряжения на шинах 0,4 кВ потребительских подстанций нет, поэтому при максимальной нагрузке отклонения напряжения обычно отрицательные, а при минимальной – положительные, т. е. принцип встречного регулирования напряжения действует наоборот. Положение усугубляется также бесконтрольным потреблением и выдачей реактивной мощности потребителями.

Использование установок компенсации реактивной мощности (УКРМ) с подключением их к шинам низшего напряжения подстанций требует учета ограничений как при выборе параметров УКРМ, так и при определении режимов работы имеющихся устройств регулирования напряжения.

Потеря напряжения в сети с КРМ, принятая равной продольной составляющей падения напряжения, при пренебрежении поперечной составляющей определяется выражением

$$\Delta U = \frac{PR + (Q - Q_k)X}{U}, \quad (1)$$

где P – поток активной мощности в сети, кВт; Q – то же реактивной мощности в сети, квар; R , X – активное и реактивное сопротивления сети, Ом; Q_k – мощность УКРМ, Ом; U – напряжение сети, кВ.

Влияние КРМ на величину потери напряжения в сети и отклонение напряжения у потребителя удобно рассматривать, оперируя показателем степени компенсации, определяемой соотношением $C = Q_k/Q$, о. е. Введя в выражение (1) степень компенсации, получим

$$\Delta U = \frac{PR + QX(1-C)}{U}. \quad (2)$$

С помощью выражения (2) можно определить фактическую потерю напряжения в любом элементе сети при любом значении степени компенсации реактивной мощности.

Действующий стандарт [3] устанавливает нормы качества электрической энергии в точках ее передачи пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения, т. е. на границах балансовой принадлежности электрических сетей. На промышленных предприятиях, имеющих на балансе подстанции глубокого ввода напряжением 110/10(6) кВ, 35/10(6) кВ, точки передачи электрической энергии, как правило, приняты на присоединениях питающих линий напряжением 110, 35 кВ. Величина согласованного напряжения и допустимые отклонения напряжения в указанных точках оговариваются в договоре электроснабжения, заключаемом между энергоснабжающей организацией и потребителем электрической энергии (абонентом). Таким образом, ответственность энергоснабжающей организации распространяется на электрическую сеть до точки передачи электрической энергии, далее – ответственность абонента.

Система электроснабжения крупного промышленного предприятия включает одну либо несколько главных понизительных подстанций напряжением 110/10(6) кВ, 35/10(6) кВ, распределительные пункты, подстанции и линии электропередачи напряжением 10, 6 кВ, а также линии напряжением до 1 кВ. Отклонение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции $\delta U_{\text{нн}}$ равно сумме отклонения напряжения на стороне высшего напряжения $\delta U_{\text{вн}}$ и надбавки трансформатора $\delta U_{\text{нб}}$ за вычетом потери напряжения в трансформаторе $\Delta U_{\text{т}}$. При подключении УКРМ к шинам низшего напряжения подстанции отклонение напряжения на стороне низшего напряжения составит

$$\delta U_{\text{нн}} = \delta U_{\text{вн}} + \delta U_{\text{нб}} - \Delta U_{\text{т}} = \delta U_{\text{вн}} + \delta U_{\text{нб}} - \frac{PR_{\text{т}} + QX_{\text{т}}(1-C)}{U}. \quad (3)$$

Значения отклонения напряжения на стороне низшего напряжения подстанции при изменении степени компенсации от 0 до 1 и различных надбавках трансформатора со ступенями РПН $\pm(9 \cdot 1,78) \%$ приведены в табл. 1. В качестве примера рассмотрен один из трансформаторов марки ТРДН 25000/110, установленный на ГПП 110/6 кВ «Гранитная» (РУПП «ГРАНИТ»). Расчетные параметры нагрузки в максимальном режиме: $P = 15,0$ МВт; $Q = 11,6$ Мвар. В расчете условно принято $\delta U_{\text{вн}} = +5 \%$ – const.

Допустим, что, согласно заданному режиму регулирования напряжения, на стороне низшего напряжения подстанции должно поддерживаться положительное отклонение напряжения в диапазоне 4–6 %. Как видно из данных табл. 1, требуемое отклонение напряжения можно обеспечить под-

бором надбавки трансформатора в диапазоне 0–5,34 % и обеспечением соответствующей степени компенсации в диапазоне 0–1. С точки зрения минимизации нагрузочных потерь мощности в сети предпочтительнее принимать степень компенсации равной или близкой к 1, а диапазон регулирования РПН определять исходя из принятой степени компенсации.

Таблица 1

Отклонение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции при различных значениях степени компенсации и надбавки трансформатора с устройством регулирования напряжения под нагрузкой

Voltage deviation on the low voltage side of the substation at different values of the degree of compensation and surcharge of the transformer with a load voltage control device

Надбавка трансформатора с устройством регулирования напряжения под нагрузкой, %	Отклонение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции при различных значениях степени компенсации, %					
	C = 0	C = 0,2	C = 0,4	C = 0,6	C = 0,8	C = 1,0
-16,02	-16,2	-15,2	-14,2	-13,2	-12,3	-11,3
-14,24	-14,4	-13,4	-12,4	-11,5	-10,5	-9,5
-12,46	-12,6	-11,6	-10,7	-9,7	-8,7	-7,7
-10,68	-10,8	-9,9	-8,9	-7,9	-6,9	-5,9
-8,90	-9,1	-8,1	-7,1	-6,1	-5,1	-4,2
-7,12	-7,3	-6,3	-5,3	-4,3	-3,4	-2,4
-5,34	-5,5	-4,5	-3,5	-2,6	-1,6	-0,6
-3,56	-3,7	-2,7	-1,8	-0,8	0,2	1,2
-1,78	-1,9	-1,0	0,0	1,0	2,0	3,0
0	-0,2	0,8	1,8	2,8	3,8	4,7
1,78	1,6	2,6	3,6	4,6	5,5	6,5
3,56	3,4	4,4	5,4	6,3	7,3	8,3
5,34	5,2	6,2	7,1	8,1	9,1	10,1
7,12	7,0	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9
8,90	8,7	9,7	10,7	11,7	12,7	13,6
10,68	10,5	11,5	12,5	13,5	14,4	15,4
12,46	12,3	13,3	14,3	15,2	16,2	17,2
14,24	14,1	15,1	16,0	17,0	18,0	19,0
16,02	15,9	16,8	17,8	18,8	19,8	20,8

В отличие от главных понизительных подстанций, цеховые подстанции промышленных предприятий напряжением 10(6)/0,4 кВ не имеют устройств РПН. Такие подстанции позволяют регулировать напряжение в узком диапазоне посредством переключения без возбуждения (ПБВ). При установке УКРМ на стороне низшего напряжения цеховых подстанций либо на промежуточных распределительных пунктах напряжением 0,4 кВ важно обеспечить требуемые уровни напряжения у потребителей. Поэтому при выборе мощности УКРМ следует производить расчет

напряжений в электрической сети и проверку отклонений напряжения у потребителей в различных режимах нагрузки.

Отклонение напряжения у потребителя δU_{Π} , получающего питание по сети 0,4 кВ, можно выразить через отклонение напряжения на шинах низшего напряжения главной понизительной подстанции $\delta U_{\text{НН}}$, надбавку напряжения трансформатора цеховой ТП 10(6)/0,4 кВ $\delta U_{\text{НБ}}$ и суммарную потерю напряжения в электрической сети напряжением 10(6) и 0,4 кВ ΔU

$$\delta U_{\Pi} = \delta U_{\text{НН}} + \delta U_{\text{НБ}} - \Delta U. \quad (4)$$

Потеря напряжения в электрической сети включает потери в основных ее элементах (линии высокого напряжения $\Delta U_{\text{ВЛ}}$, трансформаторе $\Delta U_{\text{Т}}$, линии низкого напряжения $\Delta U_{\text{НЛ}}$) и определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_{\text{ВЛ}} + \Delta U_{\text{Т}} + \Delta U_{\text{НЛ}} = \\ &= \frac{P_{\text{ВЛ}} R_{\text{ВЛ}} + Q_{\text{ВЛ}} X_{\text{ВЛ}}}{U_{\text{ВЛ}}} + \frac{P_{\text{Т}} R_{\text{Т}} + Q_{\text{Т}} X_{\text{Т}}}{U_{\text{Т}}} + \frac{P_{\text{НЛ}} R_{\text{НЛ}} + Q_{\text{НЛ}} X_{\text{НЛ}}}{U_{\text{НЛ}}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $P_{\text{ВЛ}}$, $Q_{\text{ВЛ}}$, $P_{\text{Т}}$, $Q_{\text{Т}}$, $P_{\text{НЛ}}$, $Q_{\text{НЛ}}$ – потоки активной и реактивной мощности в линии высокого напряжения, трансформаторе, линии низкого напряжения соответственно; $R_{\text{ВЛ}}$, $X_{\text{ВЛ}}$, $R_{\text{Т}}$, $X_{\text{Т}}$, $R_{\text{НЛ}}$, $X_{\text{НЛ}}$ – активное и реактивное сопротивление линии высокого напряжения, трансформатора, линии низкого напряжения соответственно; $U_{\text{ВЛ}}$, $U_{\text{Т}}$, $U_{\text{НЛ}}$ – напряжение линии высокого напряжения, обмотки высшего напряжения трансформатора, линии низкого напряжения соответственно.

При подключении УКРМ к шинам низшего напряжения подстанции уменьшаются потери напряжения в линии высокого напряжения и трансформаторе. Суммарная потеря напряжения в электрической сети

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{P_{\text{ВЛ}} R_{\text{ВЛ}} + (Q_{\text{ВЛ}} - Q_{\text{К}}) X_{\text{ВЛ}}}{U_{\text{ВЛ}}} + \\ &+ \frac{P_{\text{Т}} R_{\text{Т}} + (Q_{\text{Т}} - Q_{\text{К}}) X_{\text{Т}}}{U_{\text{Т}}} + \frac{P_{\text{НЛ}} R_{\text{НЛ}} + Q_{\text{НЛ}} X_{\text{НЛ}}}{U_{\text{НЛ}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом степени компенсации и коэффициента мощности нагрузки выражения для определения потери напряжения в сети и отклонения напряжения у потребителя можно представить в виде:

$$\Delta U = \frac{PR}{U^2} [1 + \text{tg}^2 \phi^2 (1 - C)]; \quad (7)$$

$$\delta U_{\Pi} = \delta U_{\text{НН}} + \delta U_{\text{НБ}} - \frac{PR}{U^2} [1 + \text{tg}^2 \phi^2 (1 - C)]. \quad (8)$$

Зависимости потери напряжения в сети от степени компенсации при различных значениях $\cos \phi$ нагрузки приведены на рис. 1. Как видно

из графиков, увеличение степени компенсации ведет к снижению потери напряжения, причем при более низком $\cos\varphi$ потеря напряжения уменьшается резче. Увеличение степени компенсации приводит к увеличению отклонения напряжения у потребителя. Если предположить, что допустимое отклонение напряжения у потребителя составляет $+5\% U_H$, то при $\cos\varphi = 0,7$ и надбавке трансформатора $\delta U_{\text{НБ}} = +5\%$ (рис. 2) обеспечить максимальную степень компенсации нельзя. Таким образом, $C = 1$ можно получить лишь при условии уменьшения величины надбавки трансформатора на одну ступень, в частности при $\delta U_{\text{НБ}} = +2,5\%$. При различном $\cos\varphi$ нагрузки отклонение напряжения у потребителя превышает допустимое значение при различных значениях степени компенсации (рис. 3). Если при $\cos\varphi = 0,7$ степень КРМ может приниматься равной 0,56, то при $\cos\varphi > 0,8$ КРМ в электрической сети в указанных условиях практически невозможна.

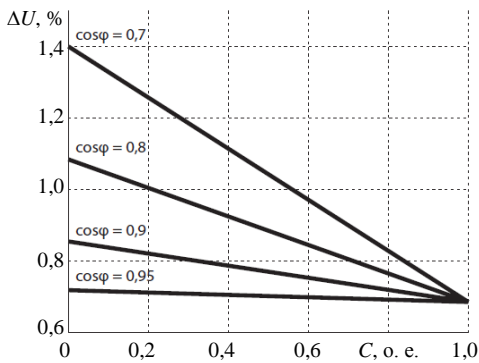


Рис. 1. Зависимость потери напряжения от степени компенсации при различных значениях $\cos\varphi$ нагрузки

Fig. 1. Dependence of the voltage loss on the degree of compensation for different values of the load $\cos\varphi$

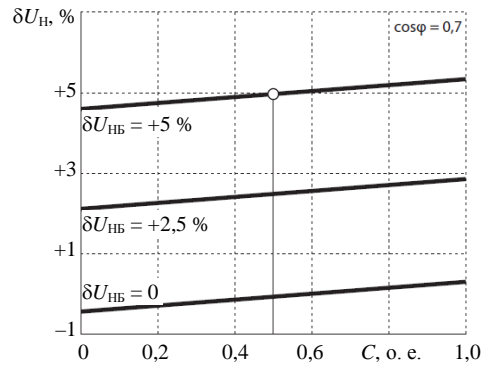


Рис. 2. Зависимость отклонения напряжения у потребителя от степени компенсации при различных надбавках трансформатора с переключением без возбуждения

Fig. 2. Dependence of the voltage deviation of the consumer on the degree of compensation for different surcharges of the transformer with switchover without excitation

При выборе требуемой мощности УКРМ в сетях с положительными отклонениями напряжения у потребителей нужно в первую очередь задействовать имеющиеся возможности регулирования напряжения за счет переключения надбавок трансформаторов с ПБВ. Если такой возможности нет (например, установлены минимальные надбавки трансформаторов), следует уменьшить мощность УКРМ, пусть и в ущерб эффективности компенсации реактивной мощности, но обеспечить требуемое качество напряжения у потребителя.

На практике зачастую регулирование напряжения на шинах трансформаторов с РПН осуществляется в ручном режиме. Подключенные к шинам подстанций УКРМ также чаще всего управляются вручную. В ряде случаев

применяются локальные устройства автоматического управления РПН трансформатора и регулируемой УКРМ, функционирующие независимо друг от друга.

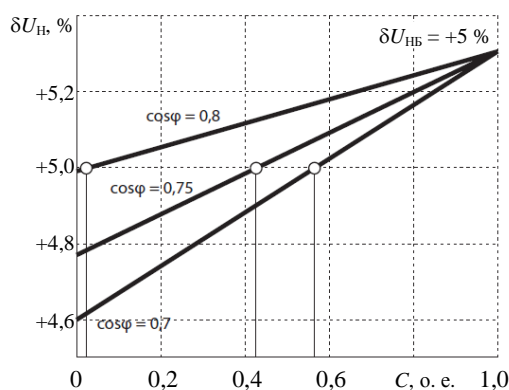


Рис. 3. Зависимость отклонения напряжения у потребителя от степени компенсации при различных значениях $\cos\varphi$ нагрузки

Fig. 3. Dependence of the voltage deviation of the consumer on the degree of compensation for different values of the load $\cos\varphi$

Ни один из указанных способов управления не позволяет обеспечивать эффективные режимы регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях предприятий. Для решения указанной задачи перспективным видится применение предложенных авторами многофункциональных устройств управления оборудованием трансформаторной подстанции с автоматическим регулированием напряжения и компенсации реактивной мощности, а также поддержания управляющих связей с более высоким уровнем энергосистемы [4–9]. Подходы и опыт решения указанных задач подробно изложены в предыдущих статьях авторов [10–17].

ВЫВОДЫ

1. Увеличение объемов потребления электроэнергии промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, электрифицированным транспортом и пр., обусловленное вводом в действие генерирующих мощностей Белорусской АЭС и ее интеграцией в баланс энергосистемы, неизбежно потребует повышения пропускной способности электрических сетей энергосистемы и промышленных предприятий, особенно сетей и подстанций напряжением 110 кВ и ниже. При решении данной задачи стоит рассмотреть возможности, предоставляемые компенсацией реактивной мощности (наиболее быстрый в реализации и дешевый способ).

2. Система электроснабжения промышленного предприятия, включающая сети до 1 кВ, а также сети и подстанции напряжением 6, 10 кВ и выше, представляет собой единое целое, и правильно определить режимы компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения можно только при совместном решении указанных задач на всех ее уровнях. Всегда следует стремиться к достижению наибольшей экономичности функцио-

нирования системы электроснабжения, но при этом для обеспечения требуемого качества напряжения у потребителей необходимо учитывать ограничения при выборе параметров устройств компенсации реактивной мощности и определении режимов работы устройств регулирования напряжения.

3. При выборе параметров и режимов работы устройств компенсации реактивной мощности на главных понизительных подстанциях напряжением 110/35/10(6) кВ, оборудованных трансформаторами с устройством регулирования напряжения под нагрузкой и реализующих встречное регулирование напряжения, следует принимать степень компенсации реактивной мощности равной или близкой к 1, что обеспечит минимальный уровень потребления реактивной мощности из внешней сети. При этом диапазон регулирования напряжения под нагрузкой следует принимать исходя из установленной степени компенсации.

4. При выборе параметров и режимов работы устройств компенсации реактивной мощности на подстанциях напряжением 10(6)/0,4 кВ, не имеющих устройств встречного регулирования напряжения, нужно учитывать возможности снижения напряжения за счет переключения надбавок трансформаторов с переключением без возбуждения. При положительных отклонениях напряжения и установленных минимальных надбавках трансформаторов следует ограничивать мощность устройств компенсации реактивной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35>.
2. Бугаева, Т. М. Современные методы планирования энергосистемы города / Т. М. Бугаева, О. В. Новикова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-377-387>.
3. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. Респ. Беларусь 01.04.2016. Минск: БелГИСС, 2016.
4. Счастный, В. П. Об эффективности функционирования комплекса технических средств в электрических сетях 0,38 кВ сельскохозяйственных объектов / В. П. Счастный // Агропанорама. 2008. № 5. С. 24–27.
5. Устройство для управления оборудованием трансформаторной подстанции: пат. 882 Респ. Беларусь / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич, А. И. Жуковский. Оpubл. 30.06.2003.
6. Устройство для управления оборудованием потребительской трансформаторной подстанции: пат. 4613 Респ. Беларусь / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич. Оpubл. 30.08.2008.
7. Устройство управления техническими средствами трансформаторной подстанции: пат. 4534 / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич, А. И. Жуковский. Оpubл. 30.08.2008.
8. Устройство для управления оборудованием двухтрансформаторной подстанции: пат. 5573 / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич. Оpubл. 30.10.2009.
9. Устройство для управления оборудованием трансформаторной подстанции, регистрации и архивации параметров и режимов электрической сети: пат. 4535 / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич. Оpubл. 30.08.2008.

10. Жуковский, А. И. Эффективность применения фильтрокомпенсирующих устройств на примере сталепроволочного цеха № 1 РУП «Белорусский металлургический завод» / А. И. Жуковский // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сент. 2007. Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. С. 99–101.
11. Жуковский, А. И. Фильтрокомпенсирующие устройства для компенсации реактивной мощности и повышения качества электроэнергии в электрических сетях металлургических предприятий / А. И. Жуковский // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сент. 2007. Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. С. 118–120.
12. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности. Проблемы и решения / А. И. Жуковский // Энергия и Менеджмент. 2007. № 3. С. 30–33.
13. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // Энергия и Менеджмент. 2008. № 3. С. 38–42.
14. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский, В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // Энергия и Менеджмент. 2013. № 4–5. С. 23–26.
15. Жуковский, А. И. К вопросу о проектировании компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // Энергия и Менеджмент. 2015. № 2. С. 20–30.
16. Счастный, В. П. Устройство управления оборудованием двухтрансформаторной подстанции при параллельной работе трансформаторов / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БГАТУ, 2019. С. 55–58.
17. Счастный, В. П. Особенности выбора установок компенсации реактивной мощности / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. Минск: БГАТУ, 2019. Ч. 1. С. 393–394.

Поступила 21.10.2020 Подписана в печать 05.01.2021 Опубликовано онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V. (2018) The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35> (in Russian).
2. Bugaeva T. M., Novikova O. V. (2019) Modern Methods of Urban Energy System Planning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-377-387> (in Russian).
3. State Standart 32144–2013. *Electric Power. The Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Quality Standards of Electricity in General-Purpose Electricity Systems*. Minsk, BelGISS Publ. 2016 (in Russian).
4. Schasny V. P. (2008) On the Effectiveness of Operation of the Complex of Technical Means in Electrical Networks of 0.38 kV Agricultural Facilities. *Agropanorama*, (5), 24–27 (in Russian).
5. Schasny V. P., Zeliankevich A. I., Zhukouski A. I. (2003) *Device for the Control of the Equipment of the Transformer Substation*. Patent No 882 Republic of Belarus (in Russian).
6. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2008) *Device for the Control of the Equipment of the Consumer Transformer Substation*. Patent No 4613 Republic of Belarus (in Russian).

7. Schasny V. P., Zeliankevich A. I., Zhukouski A. I. (2008) *Device for the Control of the Means of Transformer Substation*. Patent No 4534 Republic of Belarus (in Russian).
8. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2009) *Device for the Control of the Equipment of the Two-Transformer Substation*. Patent No 5573 Republic of Belarus (in Russian).
9. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2008) *Device for the Control of the Equipment of the Transformer Substation, Registration and Archiving of Parameters and Modes of the Electrical Network*. Patent No 4535 Republic of Belarus (in Russian).
10. Zhukouski A. I. (2007) Efficiency of the Use of Filtration-Compensating Devices on the Example of the Steel Wire Workshop No 1 of the Belarusian Steel Works. *Metallurgiya i Liteinoe Proizvodstvo 2007. Belarus': Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Zhlobin, 6–7 Sent. 2007* [Metallurgy and Foundry Production 2007. Belarus: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Zhlobin, Sept. 6–7, 2007]. Zhlobin, Belarusian Steel Works Industry Association, 99–101 (in Russian).
11. Zhukouski A. I. (2007) Filter-Compensating Devices to Compensate for Reactive Power and Improve the Quality of Electricity in the Electrical Networks of Steel Mills. *Metallurgiya i Liteinoe Proizvodstvo 2007. Belarus': Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Zhlobin, 6–7 Sent. 2007* [Metallurgy and Foundry Production 2007. Belarus: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Zhlobin, Sept. 6–7, 2007]. Zhlobin, Belarusian Steel Works Industry Association, 118–120 (in Russian).
12. Zhukouski A. I. (2007) Reactor Power Compensation. Problems and Solutions. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 30–33 (in Russian).
13. Zhukouski A. I. (2008) Compensation of Reactive Power and Improving the Quality of Electricity in the Electrical Grids of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 38–42 (in Russian).
14. Zhukouski A. I., Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2013) Compensation of Reactive Power in Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4–5), 23–26 (in Russian).
15. Zhukouski A. I. (2015) Towards the Problem of the Design of Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (2), 20–30 (in Russian).
16. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2019) Equipment Control Device of Two-Transformer Substation in Conditions of Parallel Operation of Transformers. *Energoberezhenie – Vazhmeishee Uslovie Innovatsionnogo Razvitiya APK: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Energy Conservation as the Most Important Condition for the Innovative Development of the AIC: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, BSATU Publ. 55–58 (in Russian).
17. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2019) Specific Features of the Selection of Jet Power Compensation Plants. *Tekhnicheskoe i Kadrovoe Obespechenie Innovatsionnykh Tekhnologii v Sel'skom Khozyaistve: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Ch. 1* [Technical and Human Resources Provision of Innovative Technologies in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Part 1]. Minsk, BSATU Publ. 393–394 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258>

UDC 621.383.51; 621.36

Simulation of Photovoltaic Thermoelectric Battery Characteristics

A. K. Esman¹, G. L. Zykov¹, V. A. Potachits¹, V. K. Kuleshov¹

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. Solar radiation is an environmentally friendly and affordable energy source with high release of energy. The use of a photovoltaic thermoelectric battery makes it possible to increase the efficiency of converting solar and thermal radiation into electrical energy, both on serene and cloudy days. An original battery structure with photovoltaic and thermoelectric converters is proposed. The 3D model of the proposed photovoltaic thermoelectric battery was realized in the COMSOL Multiphysics software environment with the use of a heat transfer module. The simulation was performed for the geographical coordinates of Minsk and taking into account the diurnal and seasonal variations of both the ambient temperature and the power density of the concentrated AM1.5 solar spectrum, the maximum value of which being varied from 1 to 500 kW/m². The dependences of the maximum temperature values of the photovoltaic thermoelectric battery and the thermoelectric converters as well as temperature gradient patterns in the thermoelectric converters have been calculated. The dependences of the maximum temperature gradient values inside the thermoelectric converters on the solar power density are obtained. The graphs of the temperature gradients inside the thermoelectric converters of the photovoltaic thermoelectric battery by concentrated solar radiation versus the time of day in the middle of July and January are provided. It is shown that the output voltage increases up to the maximum values of 635 and 780 mV, respectively, in January and in July were achieved due to the temperature stabilization of the back side of the external electrodes of the proposed device

Keywords: thermoelectric converter on the basis of CuInSe₂, numerical simulation, COMSOL Multiphysics, solar radiation concentrator, solar power density, temperature stabilization, temperature gradient, output voltage amplitude

For citation: Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2021) Simulation of Photovoltaic Thermoelectric Battery Characteristics. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 250–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258>

Моделирование характеристик фототермоэлектрической батареи

А. К. Есман¹, Г. Л. Зыков¹, В. А. Потачиц¹, В. К. Кулешов¹

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Солнечное излучение является экологически чистым и доступным источником энергии с высокой энергоотдачей. Использование фототермоэлектрической батареи позволяет увеличить эффективность преобразования солнечного и теплового излучений в электрическую

Адрес для переписки

Есман Александр Константинович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-50
ak_esman@bntu.by

Address for correspondence

Esman Alexander K.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-50
ak_esman@bntu.by

в электрическую энергию как в ясные, так и в пасмурные дни. В данной работе предложена оригинальная структура батареи с фото- и термоэлектрическими преобразователями. Трехмерная модель фототермоэлектрической батареи реализована в программном обеспечении COMSOL Multiphysics с использованием модуля «Теплопередача». Моделирование проводилось для географических координат г. Минска с учетом суточного и сезонного изменений температуры окружающей среды и плотности мощности концентрированного солнечного излучения спектра AM1.5, максимальное значение которой варьировалось от 1 до 500 кВт/м². Рассчитаны зависимости максимальных значений температуры фототермоэлектрической батареи, термоэлектрических преобразователей, а также профили распределения градиента температуры в термоэлектрических преобразователях. Получены зависимости максимальных значений градиента температуры внутри термоэлектрических преобразователей от плотности мощности солнечного излучения. Построены графики зависимостей градиентов температуры внутри термоэлектрического преобразователя фототермоэлектрической батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения от времени суток в середине июля и января. Показано, что за счет термостабилизации тыльной стороны внешних электродов предложенного устройства удалось достичь увеличения выходного напряжения до максимальных значений 635 мВ в январе и 780 мВ в июле.

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь на основе CuInSe₂, численное моделирование, COMSOL Multiphysics, концентратор солнечного излучения, плотность мощности солнечного излучения, стабилизация температуры, градиент температуры, амплитуда выходного напряжения

Для цитирования: Моделирование характеристик фототермоэлектрической батареи / А. К. Есман [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 250–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258>

Introduction

A special place among alternative and renewable energy sources is occupied by photovoltaic (PV) batteries [1–4] due to their minimal negative impact on the environment. Despite the improvement of the technology for the production of solar cells (SCs) and the manufacture of new structures of semiconductor materials, scientists continue to search for other possibilities for more rational structures and algorithms for the operation of PV batteries. One of the reasons of the decrease in the efficiency of SCs is that part of the absorbed energy is converted into heat, which can lead to overheating of both single SCs and the entire battery; moreover, performance characteristics deterioration and their service life decrease can occur when using solar radiation concentrators [5–7].

The purpose of this paper is to develop and realize a 3D model of the PV thermoelectric battery in the COMSOL Multiphysics software environment, to calculate and evaluate its temperature characteristics and output voltage obtained under conditions of the diurnal and seasonal variations of the ambient temperature and the power density of the concentrated solar radiation. The search for ways to improve the conversion efficiency of solar energy into electric energy has been carried out.

Construction of the photovoltaic thermoelectric battery

The structure of the proposed PV thermoelectric battery is shown in the Fig. 1 [8]. In it, semiconductor PV cells 1 are interconnected through molybdenum metal layers 5 ($(x = 25\text{--}90 \mu\text{m}) \times (y = 1000 \mu\text{m}) \times (z = 700\text{--}1000 \mu\text{m})$)

in size, see Fig. 1, 2), which located at the interface between these elements. Each of the PV cells includes diffusion doped p -type 2 and n -type 3 silicon layers (the size of each layer is $(x = 0.8 \mu\text{m}) \times (y = 1000 \mu\text{m}) \times (z = 500 \mu\text{m})$). TiO_2 structured dielectric coating 4 ($(x = 300 \mu\text{m}) \times (y = 1000 \mu\text{m}) \times (z = 0.5 \mu\text{m})$ in size) are deposited on the front side of diffusion doped p -type and n -type silicon layers, as well as on silicon semiconductor material 6 ($(x = 298.4 \mu\text{m}) \times (y = 1000 \mu\text{m}) \times (z = 0.5 \mu\text{m})$ in size). Aluminum mirror coatings 7 are located on the front external surface of the metal layers and are optically connected through structured dielectric coatings to the diffusion doped p -type and n -type silicon layers, as well as to the semiconductor material of PV cells. CuInSe_2 -based thermoelectric converters 8 with external 10 and internal 11 molybdenum electrodes are thermally connected to the molybdenum metal layers through Al_2O_3 -based dielectric layers 9 ($(x = 27\text{--}92 \mu\text{m}) \times (y = 1000 \mu\text{m}) \times (z = 1 \mu\text{m})$ in size).

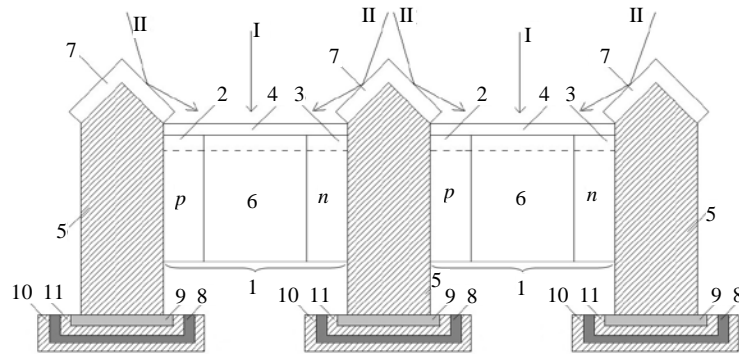


Fig. 1. The photovoltaic thermoelectric battery structure: 1 – PV cell; 2, 3 – diffusion doped p - and n -type silicon layers respectively; 4 – TiO_2 structured dielectric coating; 5 – molybdenum metal layer; 6 – silicon semiconductor material; 7 – aluminum mirror coating; 8 – CuInSe_2 -based thermoelectric converter; 9 – Al_2O_3 -based dielectric layer; 10, 11 – external and internal molybdenum electrodes respectively

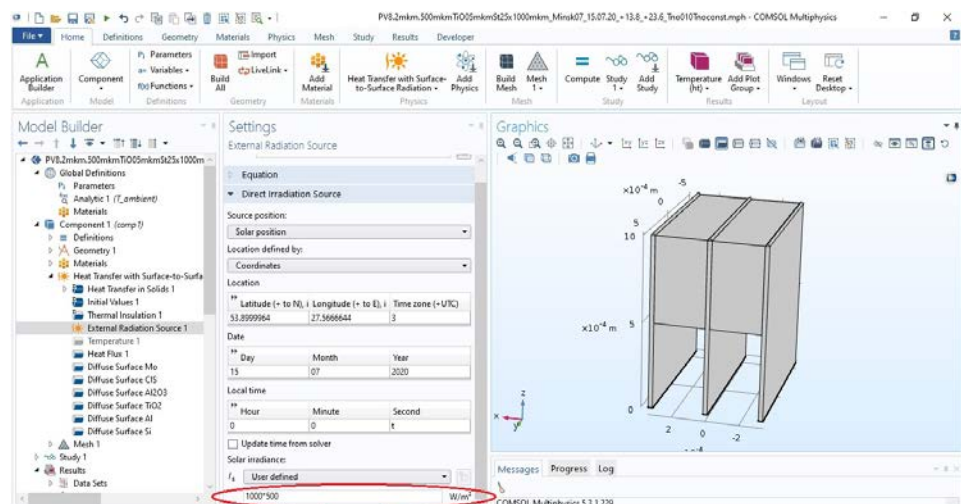


Fig. 2. Screenshot of the setting window of the external radiation source by using the Solar Position option in the COMSOL Multiphysics

Operation algorithm of the photovoltaic thermoelectric battery

The PV thermoelectric battery works as follows. The input solar radiation, incident on the surface of the structured dielectric coating, penetrates through it directly (Fig. 1, rays I) and after reflection from the mirror coating (Fig. 1, rays II). Therefore, due to the antireflection effect of the structured dielectric coating, this radiation enters almost completely into the PV cells and is absorbed in them, which causes photogeneration of charge carriers. One part of the generated charges is separated by the fields of the $p-n$ junctions of the PV cells. This leads to the generation of the photo-ElectroMotive Force (photo-EMF). Another part of the generated charges recombines. This provides the heating of the semiconductor material. The thermal energy of the semiconductor material, due to the heat transfer, heats the metal layers in respect of the ambient temperature. As a result, the temperature gradient arises inside the thermoelectric converters, since the external electrodes are kept at the ambient temperature. This causes the appearance of the corresponding thermo-EMF and thereby increases the efficiency of the device.

Computer simulation

The COMSOL Multiphysics software environment was used to simulate the characteristics of the proposed PV thermoelectric battery. This software environment allows taking into account all of the specified and/or variable parameters when solving most applied problems. The simulation was performed using the heat transfer module of this software environment [9–13], in which the developed numerical model of the PV thermoelectric battery was implemented and its characteristics were calculated in the presence and absence of its temperature stabilization. The presence of the temperature stabilization means that the temperature of the external electrodes is kept equal to the ambient temperature. The calculations were performed for the geographical coordinates of Minsk. The simulation was performed taking into account the diurnal and seasonal variations of both the ambient temperature and the power density of the AM1.5 solar spectrum, the maximum values of which manually ranged from 1 to 500 kW/m² (Fig. 2, see area, marked by red ellipse) by using concentrators. In climatology, the diurnal variation of the ambient temperature is usually considered. This diurnal variation is averaged over long-term period, when non-periodic temperature changes offset each other and the diurnal variation curve of the ambient temperature follows a simple 24-hour periodic sinusoidal distribution around the average temperature:

$$T_{amb}(t) = T_{avg} + \Delta T \cos\left(2\pi \frac{t-14}{24}\right),$$

where T_{avg} , ΔT stand for two adjustable parameters corresponding to the average temperature and half diurnal temperature variation, respectively; t stands for the variable time in hours.

The above-mentioned function is used when performing simulation. Average minimum ($T_{avg} - \Delta T$) and average maximum ($T_{avg} + \Delta T$) monthly ambient temperatures data in Minsk were taken from the site: <http://belmeteo.net>. In addition, the solar radiation incident angles on the battery were determined by the geographic location and time of day [9].

Thus, the PV thermoelectric battery was divided into finite tetrahedral elements in the simulation (Fig. 3). The grid density of each layer was customized by taking into account the tetrahedron geometry by selecting one of the preset modes: from extremely fine to extremely rough. If it is necessary to use a finer grid in any area, the partitioning was performed by manually setting. The program facilities enable to handle and visualize calculated numerical data for all the reviewed operating regimes of the PV thermoelectric battery.

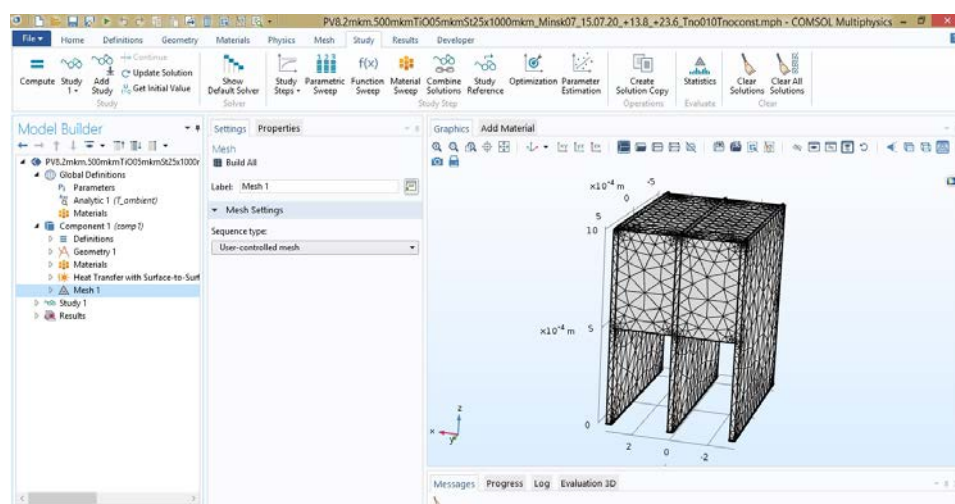


Fig. 3. Screenshot of the mesh operation of the PV thermoelectric battery in the COMSOL Multiphysics

Analysis of the results

According to the results, the uneven heating of both the surface and internal layers of the PV thermoelectric battery without temperature stabilization occurs during its operation under conditions of diurnal and seasonal variations of the ambient temperature and the solar radiation power density. The increase in the solar power density, the maximum value of which is varied within $1 \text{ kW/m}^2 \leq P_{\max} \leq 500 \text{ kW/m}^2$, leads to the temperature variations of the PV thermoelectric battery in the range from $36.5 \text{ }^\circ\text{C}$ to temperatures corresponding to its failure. As it follows from [4, 14, 15], the operating temperatures of the PV thermoelectric batteries in various systems can vary from 25 to $60 \text{ }^\circ\text{C}$, depending on the used materials, design features and the solar radiation concentration. The temperature stabilization of the back side of the external electrodes of the PV thermoelectric battery at the ambient temperature makes it possible to reduce the operating temperature (up to $+22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ in January and up to $+48.2 \text{ }^\circ\text{C}$ in July at $P_{\max} = 500 \text{ kW/m}^2$ (Fig. 4, curve 1) of this battery and, in particular,

the operating temperature (up to $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ in January and up to $24.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ in July, when $P_{\text{max}} = 500\text{ kW/m}^2$ (Fig. 4, curve 2) of the thermoelectric converter and to increase the temperature gradient (by a factor of 7.6 in July and 10.9 in January, when $P_{\text{max}} = 500\text{ kW/m}^2$ (Fig. 5, curves 2, 2')) inside the thermoelectric converters. It should be noted that a significant temperature gradient occurs inside thermoelectric converters regardless of the ambient temperature (Fig. 6).

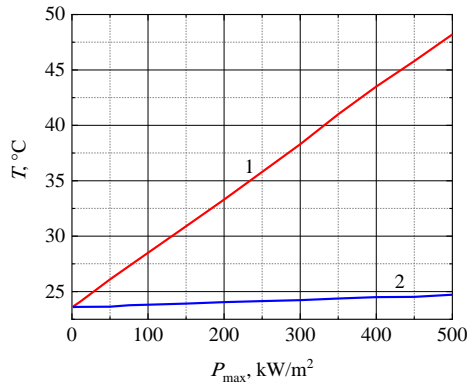


Fig. 4. The maximum operating temperature values of the PV thermoelectric battery (curve 1) and its CuInSe₂-based thermoelectric converter (curve 2) in case of the temperature stabilization of the back side of the external electrodes in the middle of July versus the solar power density, the maximum value of which is varied from 1 to 500 kW/m²

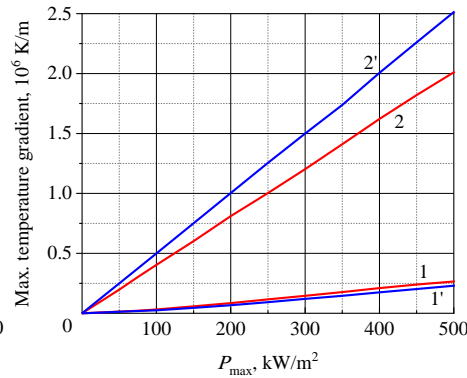


Fig. 5. The maximum values of the temperature gradient inside the thermoelectric converters of the PV thermoelectric battery without (curves 1, 1') and with (curves 2, 2') the temperature stabilization of the back side of the external electrodes in the middle of January (curves 1', 2') and July (curves 1, 2) versus the solar power density, the maximum value of which is varied from 1 to 500 kW/m²

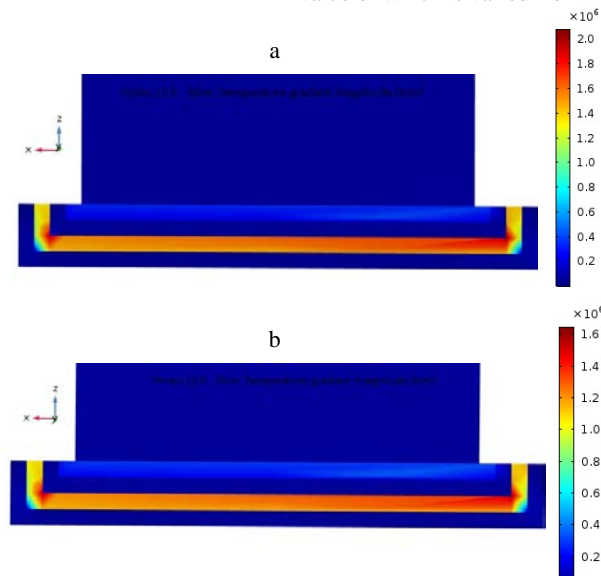


Fig. 6. The temperature gradient patterns inside the thermoelectric converter of the PV thermoelectric battery in one of the cross sections parallel to the XZ plane under concentrated solar radiation conditions with maximum power density of 500 kW/m² at 12 o'clock in the middle of: a – January; b – July

Our calculations allowed us to estimate how much the amount of incident solar radiation on the southeast and southwest sides of the PV thermoelectric battery differs between themselves and from the amount of incident solar radiation on the other sides. At the same time, at about 12 o'clock the southeast side receives this amount of solar radiation, and at about 14 o'clock the southwest side receives this amount of solar radiation. As a result, without taking into account cloudiness, the temperature gradients reach maximum values at the beginning (at about 12 o'clock) on the southeast side and then (at about 14 o'clock) on the southwest side. The temperature gradients are lower by ~12 % on the northeast and northwest sides. The dependences of the temperature gradients are presented only for the southeast side of the thermoelectric converters. For all other sides, the dependences of the temperature gradients are similar in appearance, only are shifted in time (northwest and southwest sides) and/or are lower (northeast and northwest sides).

Fig. 7 shows the diurnal changes of the temperature gradients inside the thermoelectric converter of the PV thermoelectric battery under conditions of irradiation of its surface by the concentrated solar radiation with the maximum power density values of 1 and 500 kW/m² in July (curve 1) and January (curve 2). As follows from the graphs shown in Fig. 7, the maximum temperature gradient values are reached at about 12 o'clock in the middle of January ($2.5 \cdot 10^6$ K/m) and in the middle of July ($2 \cdot 10^6$ K/m). In January the maximum temperature gradient values are about 20 % higher than in July (Fig. 5, 7), which caused, on the one hand, by the temperature stabilization of the back side of the external electrodes of the PV thermoelectric battery at the ambient temperature, which in January is lower than in July, and, on the other hand, by the concentrated solar radiation exposure on all cells of the PV thermoelectric battery throughout the daylight hours. However, owing to the daylight hours in July are longer than in January, the total energy gain, obtained throughout the day in July, inside the thermoelectric converters of the PV thermoelectric battery is greater than in January.

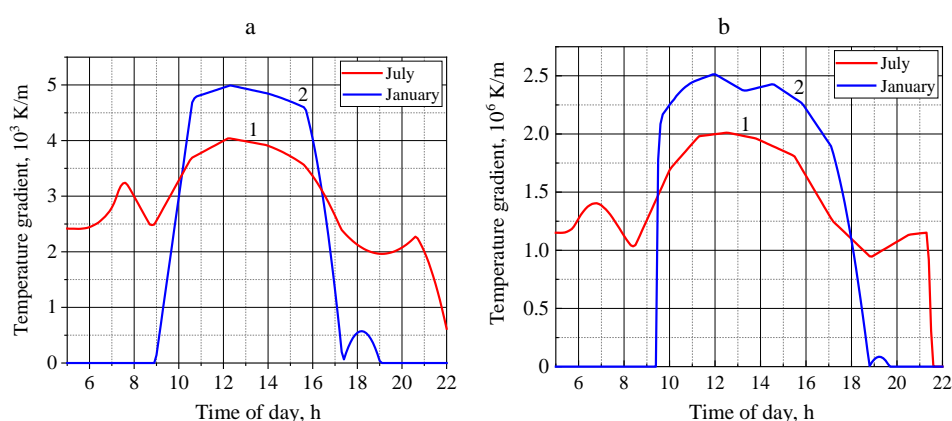


Fig. 7. The temperature gradients inside the thermoelectric converter of the PV thermoelectric battery under exposure of the concentrated solar radiation versus the time of day in the middle of July (curve 1) and in the middle of January (curve 2) with maximum power density: a – 1 kW/m²; b – 500 kW/m²

The reached maximum values of the temperature gradients (Fig. 7) between the external and internal electrodes of the thermoelectric converters of the PV thermoelectric battery under exposure of the concentrated solar radiation with maximum power density of 500 kW/m^2 lead to the fact that the potential difference generated between these electrodes in January and July also reaches maximum values of 81.1 and 64.9 mV, respectively, at about 12 o'clock. The total generated potential difference throughout the day (at $P_{\max} = 500 \text{ kW/m}^2$) in the middle of January and in the middle of July is 635 and 780 mV, respectively.

CONCLUSION

The 3D model of the proposed PV thermoelectric battery was developed and realized in the COMSOL Multiphysics software environment. Using this model, the temperature characteristics and output voltages of the proposed PV thermoelectric battery were calculated and evaluated under conditions of the diurnal and seasonal variations of the ambient temperature and the power density of the AM1.5 solar spectrum. In these conditions, the values of the solar power density were varied by using concentrators, and their maximum values were varied in the range from 1 to 500 kW/m^2 . The temperature stabilization of the back side of the external electrodes of the PV thermoelectric battery at the ambient temperature makes it possible to reduce the uneven heating of the surface and to reduce the operating temperature of the PV thermoelectric battery (up to $+22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ in January and up to $+48.2 \text{ }^\circ\text{C}$ in July at the maximum value of the concentrated solar power density $P_{\max} = 500 \text{ kW/m}^2$) and to increase the temperature gradient (by a factor of 7.6 in July and 10.9 in January, when $P_{\max} = 500 \text{ kW/m}^2$) inside the thermoelectric converters. Calculations have shown that the maximum values of the temperature gradient of the PV thermoelectric battery in January are about 20 % higher than in July. However, the total energy gain, obtained throughout the day in July, inside the thermoelectric converters of the PV thermoelectric battery is greater than in January. In this case, the amplitude of the output voltage generated by the thermoelectric converter reaches maximum values of 81.1 mV (in January) and 64.9 mV (in July) at about 12 o'clock. The total amplitude of the output voltage of the PV thermoelectric battery generated by the thermoelectric converter throughout the day (at $P_{\max} = 500 \text{ kW/m}^2$) in the middle of January and in the middle of July is 635 and 780 mV, respectively. The carried out analysis has shown that under conditions of intense irradiation, the examined PV thermoelectric battery allows not only to increase the energy release per unit area, but also to increase the efficiency.

REFERENCES

1. Licht A., Pfiester N., DeMeo D., Chivers J., Vandervelde Th. E. (2019) A Review of Advances in Thermophotovoltaics for Power Generation and Waste Heat Harvesting. *MRS Advances*, 4 (41–42), 2271–2282. <https://doi.org/10.1557/adv.2019.342>.

2. Angenendt G., Zurmühlen S., Rücker F., Axelsen H., Sauer D. U. (2019) Optimization and Operation of Integrated Homes with Photovoltaic Battery Energy Storage Systems and Power-to-Heat Coupling. *Energy Conversion and Management: X*, 1, 100054-1–100054-17. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100005>.
3. Omair Z., Scranton Gr., Pazos-Outon L. M., Xiao T. P., Steiner M. A., Ganapati V., Peterson P. F., Holzrichter J., Atwater H., Yablonovitch E. (2019) Ultraefficient Thermophotovoltaic Power Conversion by Band-Edge Spectral Filtering. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116 (31), 15356–15361. <https://doi.org/10.1073/pnas.1903001116>.
4. Vega-Garita V., Ramirez-Elizondo L., Bauer P. (2017) Physical Integration of a Photovoltaic-Battery System: a Thermal Analysis. *Applied Energy*, 208, 446–455. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.007>.
5. Saxena P., Gorji N. E. (2019) COMSOL Simulation of Heat Distribution in Perovskite Solar Cells: Coupled Optical-Electrical-Thermal 3D Analysis. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9 (6), 1693–1698. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2019.2940886>.
6. Mamadalieva L. (2020) New Design of the Selective Photothermogenerator with a Fixed Slit. *Physics and Mathematics*, 9, 1–7. <https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.09.14.html> (in Russian).
7. Cotfas P. A., Cotfas D. T. (2020) Comprehensive Review of Methods and Instruments for Photovoltaic-Thermoelectric Generator Hybrid System Characterization. *Energies*, 13 (22), 6045-1–6045-32. <https://doi.org/10.3390/en13226045>.
8. Esman A. K., Kuleshov V. K., Zykov G. L., Zalesski V. B. (2016) *Photovoltaic Thermoelectric Battery*: Patent No 19928 Republic of Belarus (in Russian).
9. Thermo-Photo-Voltaic Cell. *COMSOL, Inc. USA*. Available at: <https://www.comsol.com/model/thermo-photo-voltaic-cell-494> (Accessed 3 February 2021).
10. Analyze Thermal Effects with the Heat Transfer Module. *COMSOL, Inc. USA*. Available at: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (Accessed 3 February 2021).
11. Esman A. K., Kuleshov V. K., Potachits V. A., Zykov G. L. (2018) Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe_2 . *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
12. Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2020) Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe_2 Chalcopyrite Structure. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13>.
13. Sathya P., Swarna Priya R. M. (2019) Numerical Modeling and Simulation of Thermophotovoltaic Cell using COMSOL. *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. Vellore, 1–5. <https://doi.org/10.1109/i-pact44901.2019.8960167>.
14. Colangelo G., de Risi A., Laforgia D. (2003) New Approaches to the Design of the Combustion System for Thermophotovoltaic Applications. *Semiconductor Science and Technology*, 18 (5), S262–S269. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/18/5/318>.
15. Mahamudul H., Rahman Md. M., Metselaar H. S. C., Mekhilef S., Shezan S. A., Sohel R., Karim S. B. A., Badiuzaman W. N. I. (2016) Temperature Regulation of Photovoltaic Module Using Phase Change Material: a Numerical Analysis and Experimental Investigation. *International Journal of Photoenergy*, 5917028-1–5917028-8. <https://doi.org/10.1155/2016/5917028>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-259-274>

УДК 620.9: 658.26: 666.97.035.5

Научно-методические основы эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках

Часть 1

В. Н. Романюк¹⁾, А. М. Нияковский²⁾

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

²⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Эксергетический метод термодинамического анализа сложных теплоэнергетических систем в последние годы получил широкое признание, доказав свою эффективность при поиске оптимальных вариантов энергоснабжения и энергопотребления. Вместе с тем его применение сдерживается отсутствием соответствующих научно обоснованных методических подходов к теплотехнологиям, в ходе которых имеют место не только энергетические, но и материальные превращения. Тепловая обработка бетонных и железобетонных изделий относится именно к таким технологиям. В данной статье представлены новые научные результаты, связанные с разработкой эксергетических балансов процессов приготовления бетонной смеси в смесителе и тепловой обработки бетонного изделия в теплотехнологической установке. Для каждого из этих случаев осуществлен анализ эксергетических потоков, определена структура эксергии бетонной смеси и твердеющего бетона. На основе анализа научных работ о химическом составе цементных клинкеров, цементов и продуктов гидратации предложены новые зависимости для расчета эксергии потока бетонной смеси и бетона при его тепловой обработке, включая термомеханическую, реакцию и концентрационную составляющие. Разработаны абсолютные эксергетические показатели. На конкретном примере с использованием разработанного научно-методического обеспечения выполнен расчет указанных величин. Во второй части будут опубликованы результаты исследования по определению относительных эксергетических показателей, позволяющих выполнять оценку энергетической эффективности процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках. Полученные результаты могут использоваться при выборе энергосберегающих режимов теплотехнологического оборудования для промышленной тепловой обработки бетонных изделий.

Ключевые слова: теплотехнологии, теплотехнологические установки, энергоэффективность, тепловая обработка бетонных изделий, эксергия бетона, эксергетический баланс, эксергетические критерии энергетической эффективности

Для цитирования: Романюк, В. Н. Научно-методические основы эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках. Часть 1 / В. Н. Романюк, А. М. Нияковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 259–274. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-259-274>

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Scientific and Methodological Bases of Exergetic Analysis of the Processes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat Technology Installations

Part 1

V. N. Romaniuk¹⁾, A. M. Niyakovskii²⁾

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

²⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. Having proven its effectiveness in finding the best options for energy supply and energy consumption the exergetic method of thermodynamic analysis of complex heat and power systems has been widely recognized in recent years. However, its application is hindered by the lack of appropriate scientific and methodological heat technology support, especially if their application involves not only transformation of energy, but also transformation of substances. Heat treatment of concrete and reinforced concrete products belongs to such technologies. This article presents new scientific results related to the development of exergetic balances of the processes of preparation of concrete mixture in a mixer and heat treatment of a concrete product in a heat-technological installation. For each of these cases, the analysis of exergetic flows was carried out, the structure of the exergy of the concrete mixture and the hardening concrete was determined. Based on the analysis of the literature data on the chemical composition of cement clinkers, cements, and hydration products, new dependences have been proposed for calculating the exergy of the concrete mixture flow and the exergy of concrete under its heat treatment, including all their components, viz. thermomechanical, reaction, and concentration constituents. Absolute energy indicators have been developed. The calculation of the mentioned values was performed on a specific example with the use of the developed scientific and methodological support. In the second part of this paper, the results of the study related to the determination of relative exergetic indicators that allow evaluating the energy efficiency of the processes of heat treatment of concrete products in heat technology installations will be published. The results obtained in this paper can be used for the selection of energy-saving modes of heat-technological equipment intended for industrial heat treatment of concrete products.

Keywords: heat technology, thermal technological equipment, energy efficiency, heat treatment of concrete products, exergy of concrete, exergetic balance, exergetic criteria of energy efficiency

For citation: Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M. (2021) Scientific and Methodological Bases of Exergetic Analysis of the Processes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat Technology Installations. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 259–274. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-259-274> (in Russian)

Введение

Применение эксергетического метода термодинамического анализа требует учета особенностей конкретной теплотехнологии. В ряде работ [1–5] предпринимались попытки выполнить эксергетический анализ теплотехнологии изготовления бетонных смесей и бетонных изделий, однако задачи определения величины полезной эксергии, необходимой для получения бетонных изделий с требуемыми физико-механическими характеристиками, а также нахождения основных составляющих эксергетического баланса остались нерешенными.

Для выполнения количественной оценки термодинамической эффективности технических систем и процессов, используемых при производстве бетонных изделий, необходимо создать соответствующее научно-методическое обеспечение, позволяющее применять эксергетический метод в данной технической области.

Теплотехнологическая установка (ТТУ) для тепловой обработки (ТО) бетонного изделия обеспечивает подвод тепловой энергии к его поверхности в течение заданного времени с целью набора им требуемой распулбочной прочности. В процессе ТО происходят технологические превращения, главной особенностью которых являются химические реакции гидратации активных частей цементного клинкера, обладающие экзотермическим эффектом. Образуется сложная система химически и физически прочно взаимосвязанных компонентов, состоящая из новых химических веществ, промежуточных продуктов реакции гидратации, еще непрореагировавших веществ, а также химически нейтральных материалов. После завершения ТО химические реакции не завершаются, а продолжают в течение длительного времени [6–11]. Исходным материальным потоком на входе ТТУ выступает бетонная смесь, состоящая из щебня, песка, цемента и воды, соединенных в заданных пропорциях в смесителе. Бетонная смесь, как и бетон, является сложной физико-химической многокомпонентной системой.

Цель первой части данной статьи – представить разработку эксергетических балансов и обоснование зависимостей, позволяющих осуществлять расчет абсолютных эксергетических показателей, эксергии бетонной смеси и твердеющего бетонного изделия при ТО в ТТУ. Во второй части будут предложены аналитические зависимости для расчета относительных эксергетических показателей и оценки энергетической эффективности режимов работы теплотехнологического оборудования при промышленной ТО бетонных изделий в ТТУ.

Определение эксергии бетонной смеси

Удельная массовая эксергия потока бетонной смеси может быть представлена суммой слагаемых [12–15]

$$e_{\text{бс}} = e_{r,\text{бс}} + e_{k,\text{бс}} + e_{pT,\text{бс}}, \quad (1)$$

где $e_{r,\text{бс}}$, $e_{k,\text{бс}}$, $e_{pT,\text{бс}}$ – реакционная, концентрационная, термомеханическая составляющие удельной массовой эксергии бетонной смеси, кДж/кг.

Приготовление бетонной смеси заключается в соединении составляющих ее твердых компонентов с водой и их перемешивании в смесителях циклического действия (60–150 с). При соединении цемента и воды начинается реакция гидратации цементного клинкера. Однако в первый час такого взаимодействия гидратации подвергается не более 1 % от общего количества цемента [6, 8], что позволяет при вычислении реакционной составляющей эксергии бетонной смеси вынести весь эффект химических

превращений за пределы смесителя, целиком отнеся его на стадию ТО бетонного изделия. Погрешность, связанная с таким упрощением, значительно меньше погрешности исходных данных и погрешности определения химической составляющей эксергии. Схема эксергетических превращений при получении бетонной смеси в смесителе представлена на рис. 1. Контрольная поверхность выбрана по границам активной зоны смесителя.

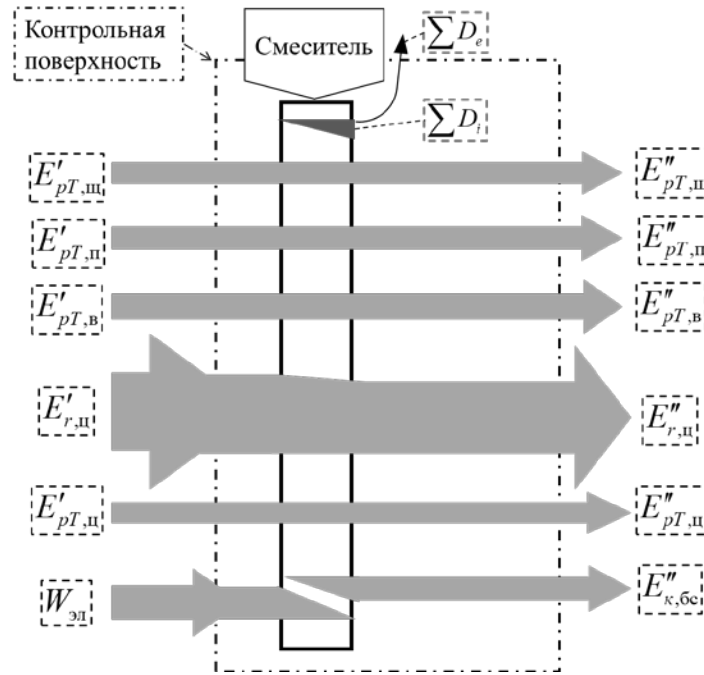


Рис. 1. Эксергетические превращения в процессе приготовления бетонной смеси в смесителе

Fig 1. Exergetic transformations during the production of concrete mix in the mixer

На рис. 1 использованы следующие обозначения: $E_{pT,щ}$, $E_{pT,п}$, $E_{pT,в}$, $E_{pT,ц}$ – термомеханические составляющие эксергии потоков щебня, песка, воды и цемента соответственно, кДж; $E_{r,ц}$ – реакционная составляющая эксергии потока цемента, кДж; $E_{к,бс}$ – концентрационная составляющая эксергии потока бетонной смеси, кДж; $W_{эл}$ – механическая энергия, подводимая к смесителю, кДж; $\sum D_e$, $\sum D_i$ – внешние и внутренние потери эксергии соответственно, кДж; индекс (') – на входе; индекс (") – на выходе.

Как следует из рис. 1 и принятых допущений, эксергия готовой бетонной смеси формируется за счет составляющих эксергии входных потоков цемента, воды, щебня и песка, а также концентрационной составляющей, обусловленной механической работой, подведенной к компонентам бетонной смеси. При этом изменения реакционной составляющей эксергии цемента и термомеханической составляющей эксергии компонентов смеси в течение непродолжительного перемешивания можно полагать незначительными.

Удельная массовая концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси $e_{k,бс}$ определяется минимальной термодинамической работой, которую необходимо произвести для разделения образующих смесь компонентов [14, 15]:

$$e_{k,бс} = s_{тк} W_{ад}, \quad (2)$$

где $s_{тк}$ – удельная поверхность смеси компонентов бетонного раствора, m^2/kg ; $W_{ад}$ – удельная работа адгезионного взаимодействия, $Дж/m^2$.

Бетонные смеси являются многофазными системами, в которых дисперсионной средой выступает вода, а дисперсной фазой – частицы заполнителя, вяжущего и воздушные включения. Возникающие в них на ранних стадиях взаимодействия (до начала процессов схватывания) обусловлены в основном различными типами адгезионных связей [6, 8–11].

Учитывая непродолжительное время перемешивания в смесителе, а также принимая во внимание вывод об условной неизменности приведенной цементом реакционной составляющей эксергии потока смеси в течение перемешивания, можно заключить, что основным фактором, определяющим термодинамическую работу разделения компонентов бетонной смеси применительно к узлу смешения, является работа адгезионного взаимодействия, обусловленная смачиванием твердой дисперсной фазы водой в самой начальной стадии превращений цемента. Удельная работа адгезионного взаимодействия воды и гладкой поверхности сухого твердого материала в системе «поверхность – вода – воздух» определяется на основании уравнения Дюпре – Юнга или его модификаций [16]

$$W_{ад} = \sigma_{жг} (1 + \cos \theta), \quad (3)$$

где $\sigma_{жг}$ – поверхностное натяжение воды, $Дж/m^2$; θ – краевой угол смачивания воды к поверхности материала.

Следует учесть, что, во-первых, в условиях производства при транспортировке и хранении на поверхности твердых компонентов формируется слой воды за счет адсорбции ее паров из атмосферного воздуха и, во-вторых, поверхность материалов является шероховатой. Для гидрофильной шероховатой поверхности краевой угол смачивания всегда меньше, чем для гладкой. Также вода затворения не является химически чистой, содержит растворенные в ней химические вещества, в том числе поступившие в момент смешения с компонентами бетонной смеси.

В силу указанных факторов действительная работа адгезии не может быть определена однозначно и отличается от величины, следующей из уравнения (3). Работа адгезионного взаимодействия воды с поверхностями минеральных компонентов бетонной смеси при краевых углах смачивания θ , равных $0-90^\circ$, лежит в пределах $W_{ад} = (69 \cdot 10^{-3})-(150 \cdot 10^{-3})$ $Дж/m^2$. Поскольку твердые компоненты бетонной смеси относятся к хорошо смачиваемым материалам, примем для последующей оценки структуры эксергии бетонной смеси величину работы адгезионного взаимодействия равной в рассматриваемых условиях $125 \cdot 10^{-3}$ $Дж/m^2$.

Величина работы адгезионного взаимодействия материалов бетонной смеси в смесителе находится в прямой связи с удельной поверхностью компонентов смеси. Если известен гранулометрический состав заполнителей, то их удельная поверхность может быть выражена в виде суммы по процентному соотношению соответствующих фракций и их удельной поверхности [6, 10].

Расчеты, выполненные на основании сведений о фактическом фракционном составе компонентов, используемых для изготовления бетонных смесей, дают средние численные значения их удельных поверхностей: цемент – 333 м²/кг, песок – 3,08, щебень – 0,173 м²/кг. Удельная поверхность всех твердых компонентов бетонной смеси вычисляется по уравнению

$$s_{\text{тк}} = \sum_{j=1}^n \frac{s_{\text{тк},j} g_{\text{тк},j}}{100}, \quad (4)$$

где $s_{\text{тк},j}$ – удельная поверхность твердого компонента, м²/кг; $g_{\text{тк},j}$ – процентное содержание твердого компонента в смеси твердых компонентов.

Содержание цемента, песка и щебня в бетонной смеси определяется требованиями, предъявляемыми при проектировании состава бетонов. В частности, для бетона общестроительного назначения класса В15 (вода – 199 кг, цемент – 300, песок 714, щебень – 1156 кг) удельная поверхность согласно формуле (4) равна 47,2 м²/кг.

Таким образом, в соответствии с изложенной методикой и принятыми допущениями удельная массовая концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси составит: $e_{\kappa, \text{бс}} = s_{\text{тк}} W_{\text{ад}} = 47,2(125 \cdot 10^{-3}) = 5,90$ Дж/кг.

Термомеханическая составляющая эксергии потока бетонной смеси определяется при неизменном давлении из соотношения [14, 15]

$$e_{pT, \text{бс}} = \sum g_{\text{бс}, j} \left(\bar{c}_{p, \text{бс}, j} \Big|_{T_0}^{T_{\text{бс}}} \left((T_{\text{бс}} - T_0) - T_0 \cdot \ln(T_{\text{бс}}/T_0) \right) \right), \quad (5)$$

где $g_{\text{бс}, j}$ – массовая доля компонента в бетонной смеси, кг/кг; $\bar{c}_{p, \text{бс}, j} \Big|_{T_0}^{T_{\text{бс}}}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость компонента бетонной смеси, средняя в интервале температур от T_0 до $T_{\text{бс}}$, кДж/(кг·К); T_0 , $T_{\text{бс}}$ – температура окружающей среды и бетонной смеси соответственно, К.

В фактических производственных условиях соотношение температуры бетонной смеси и окружающей среды зависит от температуры наружного воздуха и воздуха помещений, твердых компонентов и воды. Интервал возможного изменения температур в этих процессах составляет 5–50 °С.

Удельная массовая изобарная теплоемкость (средняя в интервале 5–50 °С) определяется известным для смесей соотношением по заданному составу и теплоемкости компонентов

$$\bar{c}_{p, \text{бс}} = \sum_{j=1}^n \bar{c}_{p, \text{бс}, j} \Big|_{T_0}^{T_{\text{бс}}} g_{\text{бс}, j}. \quad (6)$$

Для бетона класса В15 удельная изобарная средняя теплоемкость смеси $\bar{c}_{p,бс} = 1,097$ кДж/(кг·К). Следовательно, термомеханическая составляющая эксергии $e_{pT,бс} = 5,42$ кДж/кг.

Реакционная удельная массовая составляющая эксергии потока многокомпонентной системы, к которой следует отнести бетонную смесь, может быть определена [13, 14] как

$$e_{r,бс} = \sum g_{бс,j} e_{\mu,бс,j}, \quad (7)$$

где $e_{\mu,бс,j}$ – удельные массовые химические составляющие эксергии компонентов бетонной смеси, кДж/кг.

Составляющие эксергии инертных материалов (песка и щебня) с учетом их химического состава могут быть приняты равными нулю [17]. Эксергия цемента $e_{цсм}$ должна определяться исходя из его минералогического состава и дисперсности.

На основании экспериментальных данных разных производителей [18] для дальнейших расчетов принят состав клинкера со следующими характеристиками: C_3S – 53 %, C_2S – 21,28, C_3A – 7,66, C_4AF – 12,16, гипс ≈ 5 %. Величины реакционной эксергии веществ определены в соответствии с данными [17] (табл. 1).

Таблица 1

Реакционная составляющая эксергии цемента на усредненный состав цементного клинкера

Reaction constituent of cement exergy on the average composition of cement clinker

Наименование минерала	Обозначение	Содержание в клинкере $g_{кл,j}$ %	Удельная массовая реакционная составляющая эксергии $e_{\mu,кл,j}$ кДж/кг	Реакционная эксергия компонентов $g_j \cdot e_{\mu,кл,j}$ кДж/кг
Алит	C_3S	53,00	2035,0	1078,6
Белит	C_2S	22,20	1500,0	333,0
Алюминат	C_3A	7,66	2540,0	194,6
Целит	C_4AF	12,14	1663,0	201,9
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	5,00	-28,7	-1,435
Итого на весь клинкер, $\sum(g_{кл,j} \cdot e_{\mu,кл,j})$		100,00	-	$e_{r,клинк} = 1806,7$

Эксергия готовой цементной смеси представляет сумму реакционной эксергии цементного клинкера и эксергии дисперсного состава цемента [4] с учетом прочих минеральных составляющих, добавляемых в цемент (например, шлак и трепел):

$$e_{цсм} = (e_{r,клинк} + e_{d,цсм})(1 - g_{мин.сост}), \quad (8)$$

где $e_{r,клинк}$ – реакционная эксергия клинкера, кДж/кг; $e_{d,цсм}$ – эксергия на создание заданного дисперсного состава, кДж/кг; $g_{мин.сост}$ – доля прочих компонентов цемента, помимо клинкера.

Согласно результатам исследований [4], величина эксергии цемента является индивидуальной характеристикой каждой его партии и находится в пределах 7000–10000 кДж/кг, что в 4–5 раз превышает реакцию эксергию цементного клинкера. Прирост эксергии готовой цементной смеси по сравнению с эксергией клинкера обусловлен потоком механической работы, затраченной на помол клинкера до нужной степени дисперсности. В рассматриваемом примере с учетом данных [4] для дальнейших расчетов примем, что для среднего состава цементной смеси величина эксергии цемента $e_{\text{це}} = 8000$ кДж/кг.

Таким образом, если принять в расчет, что химическая эксергия песка и щебня равна нулю, удельная массовая эксергия потока бетонной смеси может быть определена из уравнения

$$e_{\text{бс}} = e_{\text{це}} g_{\text{це}} + e_{\text{к,бс}} + e_{\text{рТ,бс}}, \quad (9)$$

где $g_{\text{це}}$ – массовая доля цемента в бетонной смеси, кг/кг.

Для бетона класса В15 массовая доля цемента $g_{\text{це}} = 0,1266$ кг/кг. В итоге эксергия бетонной смеси, покидающей смеситель, составит $0,1266 \cdot 8000 + 5,90 + 5,42 \cdot 10^{-3} = 1018,7$ кДж/кг с учетом затрат на измельчение и $0,1266 \cdot 1816,7(1 - 0,05) + 5,90 + 5,42 \cdot 10^{-3} = 223,2$ кДж/кг без учета этих затрат (здесь 0,05 – доля прочих компонентов в цементе, помимо клинкера).

В полученной величине эксергии бетонной смеси составляющая, привнесенная цементом, на несколько порядков превышает остальные слагаемые. Таким образом, можно ограничиться достигнутой точностью полученного решения в отношении концентрационной и термомеханической составляющих эксергии и признать приемлемыми сделанные ранее допущения при их определении.

Эксергия потока бетонной смеси, используемой для формовки бетонного изделия, выражается уравнением

$$E'_{\text{бс}} = e_{\text{бс}} M_{\text{бет}}, \quad (10)$$

где $M_{\text{бет}}$ – масса бетона, кг.

Указанная эксергия представляет собой компоненту эксергетического входа в ТТУ, предназначенную для формовки и ускоренной гидратации цемента. Из выполненных расчетов следует, что эксергия цемента является одним из главных энергетических ресурсов в ходе технологических преобразований вещества в процессе ТО в ТТУ.

Определение эксергии бетонного изделия

Бетонное изделие формируется и подвергается в ТТУ тепловой обработке, благодаря которой бетон набирает назначенную прочность в заданное время. Набор прочности обеспечивается протеканием реакций гидратации активной части цементного клинкера, в результате чего образуется твердый цементный камень. Тепловая обработка ускоряет набор прочности.

При достижении бетоном в изделии распалубочной прочности процесс ТО считается завершенным, однако набор прочности продолжается путем естественного твердения за счет остаточной реакционной способности бетонного раствора, но уже за пределами ТТУ. Схема эксергетических потоков в ходе ТО в ТТУ показана на рис. 2. Контрольная поверхность выбрана по границам отформованного бетонного изделия, находящегося в пределах объема, ограниченного рабочими плоскостями ТТУ.

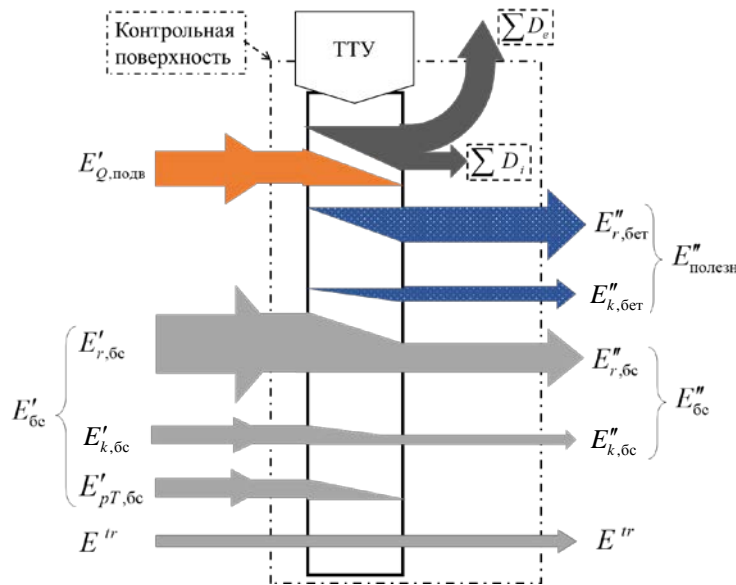


Рис. 2. Эксергетические превращения в процессе тепловой обработки бетонного изделия в теплотехнологической установке

Fig. 2. Exergetic transformations in the process of heat treatment of a concrete product in a heat technology installation

На рис. 2 использованы следующие обозначения: $E'_{Q,подв}$ – эксергия подведенного теплового потока, кДж; $E''_{r,бет}$ – реакционная эксергия продуктов гидратации в изделии, кДж; $E''_{k,бет}$ – концентрационная составляющая эксергии бетона в бетонном изделии, кДж; $E''_{полезн}$ – полезная эксергия бетона в изделии, кДж; $E_{6с}$ – эксергия потока бетонной смеси, кДж; $E_{r,6с}$, $E_{k,6с}$, $E_{pT,6с}$ – реакционная, концентрационная и термомеханическая составляющие эксергии бетонной смеси соответственно, кДж; E^{tr} – транзитная эксергия прочих потоков, кДж; $\sum D_e$, $\sum D_i$ – внешние и внутренние потери эксергии соответственно, кДж; индекс (') – на входе; индекс (") – на выходе. Следует отметить, что внешние потери эксергии обусловлены тепловыми потерями ТТУ в окружающую среду.

Эксергетический баланс процесса ТО в ТТУ выражается уравнением

$$E'_{6с} + E'_{Q,подв} + E^{tr} = (E''_{r,бет} + E''_{k,бет}) + E''_{6с} + E^{tr} + \sum D_e + \sum D_i. \quad (11)$$

Таким образом, эксергия твердеющего бетонного изделия на выходе ТТУ, но после остывания до температуры окружающей среды составляет

$$E''_{\text{би}} = (E''_{r,\text{бет}} + E''_{k,\text{бет}}) + E''_{\text{бс}} + E'' \quad (12)$$

Рассмотрим величины, входящие в (12). Сумма эксергий $E''_{r,\text{бет}} + E''_{k,\text{бет}} = E''_{\text{полезн}}$ ассоциируется с достигнутой к моменту окончания ТО прочностью бетона, величина $E''_{\text{бс}}$ представляет собой эксергию не завершившего гидратацию цемента потока бетонной смеси, потенциал которой будет использован при дальнейшем твердении изделия за пределами ТТУ. Эксергия конечных продуктов гидратации зависит от их реакционных эксергий. Соответствующие сведения представлены в табл. 2, при составлении которой использовались данные работ [5, 7, 17–20].

Таблица 2

Реакционные составляющие эксергии потока продуктов гидратации цемента
Reactionary exergy constituents of the flow of cement hydration products

Наименование продукта	Химическая формула или обозначение	Содержание в цементном камне $g_{h,i}$, %		Удельная массовая реакционная составляющая эксергии $e_{\mu,i}$, кДж/кг
		Пределы изменения	Принято для расчетов в данной работе	
Гидросиликат кальция	C-S-H	50–60	60,0	1178
Гидроксид кальция	Ca(OH) ₂	20–25	25,0	1831
Гидросульф-алюминат кальция	3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ × (31–32)H ₂ O	15–20	15,0	364,9
На весь принятый для расчетов состав			100,0	1219,3

Данные табл. 2 позволяют определить реакционную составляющую удельной массовой эксергии твердеющего бетона $e_{r,\text{бет}}$ и максимальную теоретически возможную реакционную составляющую эксергии бетона $E''_{r,\infty}^{\text{max}}$ на момент полного завершения процесса твердения (при степени гидратации $H = 100\%$):

$$E''_{r,\infty}^{\text{max}} = e_{r,\text{бет}} M_{\text{бет}} \gamma \varphi; \quad (13)$$

$$e_{r,\text{бет}} = \sum_{i=1}^{i=n} (g_{h,i} e_{\mu,i}), \quad (14)$$

где γ – массовая доля активной части цементного клинкера в цементе; φ – то же продуктов гидратации в затвердевшем бетоне, определяемая из материального баланса реакции гидратации как сумма массовых долей цемента и воды в бетонной смеси; $g_{h,i}$ – массовая доля компонента, составля-

ющего смесь продуктов гидратации, в общем количестве продуктов гидратации; $e_{\mu,i}$ – удельная массовая реакционная составляющая эксергии компонентов продуктов гидратации, кДж/кг.

Реакция гидратации цементного клинкера протекает на протяжении всего жизненного цикла бетонного изделия. В силу внутренних потерь реакционной составляющей эксергии бетона, вызванных недостаточным взаимодействием компонентов цемента с водой, максимальная реакционная составляющая эксергии продуктов гидратации в готовом бетонном изделии $E_{r,\infty}^{\max}$ практически не достигается и всегда составляет фактическую величину $E_{r,\infty}^{\text{факт}}$.

Для оценки указанной особенности процесса твердения бетона введем коэффициент ψ , позволяющий учесть неполноту протекания реакции гидратации в результате внутренних потерь эксергии:

$$E_{r,\infty}^{\text{факт}} = \psi E_{r,\infty}^{\max}. \quad (15)$$

Величина коэффициента ψ зависит от качества цемента, а также от соблюдения технологий приготовления бетонной смеси и ТО бетона. В научной литературе отсутствуют однозначные рекомендации по этому поводу. Определение его значения является задачей строительного материаловедения. Однако с достаточной для предварительных расчетов точностью можно принять, что коэффициент $\psi = 0,8\text{--}0,85$.

Концентрационная составляющая эксергии изделия, входящая в уравнение (12), определяется минимальной термодинамической работой, которую необходимо произвести для разделения образующих смесь или раствор компонентов. Связь между прогидратировавшим цементом (вяжущим) и минеральными компонентами твердеющего бетона (щебень и песок) обусловлена силами адгезионного взаимодействия, возникающими при формировании цементного камня [21, 22].

В общем случае работа адгезионного взаимодействия вычисляется по уравнению (2). Однако для ее определения требуется знать удельную работу сил адгезии. В научно-технической литературе в качестве характеристики адгезионного взаимодействия в цементах используются понятия адгезионной прочности или давления адгезии [22], определение величин которых доступно экспериментальными методами. Оценить концентрационную составляющую эксергии можно исходя из работы сил упругой деформации в бетоне. На такую связь между энергетическими и прочностными характеристиками бетона указывал И. Н. Ахвердов [6, с. 425–427]. Расчеты показывают, что предельное значение потенциальной энергии деформации бетонного изделия составляет 0,045 Дж/кг. Из этого следует, что влияние концентрационной составляющей эксергии бетона на эксергетический баланс при ТО незначительное и отдельного уточнения не требует. Это также позволяет полагать, что концентрационной составляющей эксер-

гии твердеющего бетона можно пренебречь в силу ее малости по сравнению с реакционной составляющей.

Транзитная эксергия прочих потоков E^{tr} в (12) является суммой эксергий компонентов, не участвующих в физико-химических превращениях (арматуры, утеплителя, защитных материалов). Их эксергии остаются постоянными или незначительно изменяются в процессе ТО в ТТУ. Таким образом, величина транзитной эксергии может быть принята неизменной и равной начальному значению на эксергетическом входе.

Оценка эффективности ТО в ТТУ должна осуществляться по величине достигнутой прочности изделия, характеризуемой степенью гидратации. Для расчета эксергии бетонного изделия, достигшего теплового равновесия с окружающей средой после завершения ТО, (12) может быть представлено в общем виде, учитывающем степень гидратации цемента и позволяющем вычислять эксергию бетонного изделия после ТО в зависимости от состава и степени гидратации цемента в бетоне (при его охлаждении до температуры окружающей среды):

$$E''_{\text{би}} = \left(\frac{H}{100} \psi e_{r,\text{бет}} M_{\text{бет}} \gamma \varphi + E^{tr} \right) + \left(1 - \frac{H}{100} \right) e_{\text{бс}} M_{\text{бет}}, \quad (16)$$

где H – степень гидратации цемента в изделии, достигнутая к моменту окончания ТО, %; $e_{r,\text{бет}}$ определяется по (14) с использованием данных табл. 2.

В уравнении (16) сумма в первых скобках выражает эксергию бетонного изделия в пределах достигнутой степени гидратации цемента, а произведение после знака сложения показывает эксергию еще не прогидратировавшей бетонной смеси. С позиций оценки энергоэффективности именно первое слагаемое характеризует результат, достигнутый в процессе ТО бетонного изделия в ТТУ:

$$E''_{\text{рез}} = \frac{H}{100} \psi e_{r,\text{бет}} M_{\text{бет}} \gamma \varphi + E^{tr}. \quad (17)$$

Величина эксергии теплового потока, подведенного к бетонному изделию в ТТУ, определяется на основе уравнения термодинамики [11–14]

$$E'_{Q,\text{подв}} = \int_1^2 \tau_e dQ, \quad (18)$$

где dQ – теплота элементарного процесса, кДж; τ_e – безразмерная эксергетическая температура процесса

$$\tau_e = 1 - T_{\text{ос}}/T; \quad (19)$$

T , $T_{\text{ос}}$ – температура в элементарном процессе и окружающей среде соответственно, К.

В случае если величина теплового потока Q и температура в элементарном процессе T принимаются постоянными, уравнение (17) упрощается [12–15]

$$E'_{Q, \text{подв}} = E'_Q = \tau_e Q. \quad (20)$$

Точное решение уравнения (18), а также расчет достигнутой при ТО в ТТУ степени гидратации H могут быть выполнены с использованием математической модели, разработанной авторами данной статьи (совместно с А. Н. Чичко и Ю. В. Яцкевичем) [23–27].

В качестве примера использования разработанной методики определения эксергии бетонной смеси и бетона рассмотрим ТО однородного бетонного изделия объемом 1 м^3 и плотностью 2369 кг/м^3 из бетонной смеси следующего состава: вода – 199 кг, цемент – 300, песок – 714, щебень – 1156 кг. Характеристики используемого цемента соответствуют указанным в табл. 1, содержание и свойства продуктов гидратации приняты согласно табл. 2. В соответствии с (10) исходная эксергия бетонной смеси в сформованном изделии, направляемом на ТО, составит без учета затрат на измельчение клинкера $E''_{\text{св}} = 223,2 \cdot 2369 = 528,8 \text{ МДж}$, а с учетом таких затрат $E''_{\text{св}} = 1018,7 \cdot 2369 = 2413,3 \text{ МДж}$. Эксергия бетонного изделия в результате ТО в соответствии с (17), но без транзитной эксергии ($E^{tr} = 0$) и с учетом (13)–(15) составит при достигнутом значении степени гидратации в 50 %: $E''_{\text{рез}} = 50/100 \cdot 0,8 \cdot 1219,3 \cdot 2369 \cdot 0,95 \cdot 0,2106 + 0 = 231,16 \text{ МДж}$.

ВЫВОДЫ

1. Разработан эксергетический баланс, описывающий эксергетические превращения энергии и вещества в процессе получения бетонной смеси в механическом смесителе, а также при тепловой обработке бетонных изделий в теплотехнологических установках.

2. Предложены аналитические зависимости, позволяющие выполнить расчет эксергии бетонной смеси, эксергии твердеющего бетона и их составляющих при заданных составе бетонной смеси и технологических параметрах тепловой обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коц, І. В. Ексергетичний аналіз теплових процесів технології виготовлення будівельних виробів / І. В. Коц, О. П. Колісник // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2011. Т. 10, № 1. С. 46–48.
2. Атоян, В. Р. Анализ эффективности теплотехнологических схем производства бетонных изделий на основе эксергетического метода / В. Р. Атоян, И. Н. Малый, А. В. Полин // Комплексное использование тепла и топлива в промышленности: межвуз. науч. сб. Саратов, 1995. С. 78–81.
3. Способ управления процессом приготовления бетонной смеси: пат. RU 2334713, МПК В 28В 11/00 / Т. М. Вердиян, Р. Т. Лукманов. Опубл. 27.09.2008.

4. Вердиян, М. А. Эксергетический анализ процессов химической технологии (на примере технологии цемента) / М. А. Вердиян, Д. А. Бобров, А. М. Вердиян. М.: РХТУ имени Д. И. Менделеева, 2004. 68 с.
5. Koroneos, C. Exergy Analysis of Cement Production / C. Koroneos, G. Roumbas, N. Mousiopoulos // *International Journal of Exergy*. 2005. Vol. 2, No 1. P. 55–68. <https://doi.org/10.1504/ijex.2005.006433>.
6. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
7. Kermeli, K. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Concrete Industry: Guide for Energy and Plant Managers / K. Kermeli, E. Worrell, E. Masanet. Berkeley: Berkeley National Laboratory University of California, 2011. 112 p. <https://doi.org/10.2172/1062106>.
8. Химия строительных материалов / Й. Планк [и др.]. Шымкент: Южно-Казахстанский гос. ун-т имени М. Ауэзова, 2016. 221 с.
9. Райхель, В. Бетон: в 2 ч. / В. Райхель; пер. с нем.; под ред. В. Б. Ратинова. М.: Стройиздат, 1979. Ч. 1: Свойства. Проектирование. Испытания. 111 с.
10. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. М.: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
11. Фридрихсберг, Д. А. Курс коллоидной химии / Д. А. Фридрихсберг. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1984. 368 с.
12. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 296 с.
13. Бродянский, В. М. Принципы определения КПД технических систем преобразования энергии и вещества / В. М. Бродянский, М. В. Сорин // *Изв. высш. учеб. заведений СССР. Энергетика*. 1985. № 1. С. 60–65.
14. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.
15. Романюк, В. Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов / В. Н. Романюк. Минск, 2010. 365 с.
16. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивания / А. Д. Зимон. М.: Химия, 1974. 416 с.
17. Степанов, В. С. Химическая энергия и эксергия веществ / В. С. Степанов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 163 с.
18. Гидравлические вяжущие вещества / И. Н. Кузнецова [и др.]. Омск: СибАДИ, 2012. 74 с.
19. Брыков, А. С. Гидратация портландцемента / А. С. Брыков. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2008. 30 с.
20. Садрашева, А. О. Гидросиликаты кальция (C–S–H) как основная фаза твердения портландцемента / А. О. Садрашева // *Ползуновский альманах*. 2016. № 3. С. 193–196.
21. Адгезия, клеи, цементы, припои / под ред. Н. Дебройна, Р. Гувинка; пер. с англ. А. Л. Козловского. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. 584 с.
22. Усов, Б. А. Химизация бетона / Б. А. Усов. М.: ИНФРА-М, 2016. 379 с.
23. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов / А. М. Няковский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191>.
24. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А. М. Няковский [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 2. С. 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145>.
25. Дискретная оптимизация программно управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А. М. Няковский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 3. С. 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292>.
26. Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А. М. Няковский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324>.

27. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А. М. Нияковский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2019. Т. 63, № 4. С. 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505>.

Поступила 06.01.2021 Подписана в печать 09.03.2021 Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Kots I., Kolesnik O. (2011) Exergy Analysis of Thermal Processes Technology Manufacture of Building Products. *Suchasni Tekhnologii, Materiali i Konstruktsii v Budivnitstvi = Modern Technologies, Materials and Design in Construction*, 1 (10), 46–48 (in Ukrainian).
2. Atoyán V. R., Malý I. N., Polín A. V. (1995) Analysis of the Efficiency of Heat-Technological Schemes for the Production of Concrete Products Based on the Exergetic Method. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Tepla i Topliva v Promyshlennosti: Mezhvuz. Nauch. Sb.* [Integrated Use of Heat and Fuel in Industry: Interuniversity Scientific Collected Papers]. Saratov, 78–81 (in Russian).
3. Verdiyán T. M., Lukmanov R. T. (2008) *Method for Controlling the Process of Preparing a Concrete Mixture*. Patent RU No 2334713 (in Russian).
4. Verdiyán M. A., Bobrov D. A., Verdiyán A. M. (2004). *Exergetic Analysis of Chemical Technology Processes (on the Example of Cement Technology)*. Moscow, Mendeleev University of Chemical Technology. 68 (in Russian).
5. Koroneos C., Roubas G., Moussiopoulos N. (2005) Exergy Analysis of Cement Production. *International Journal of Exergy*, 2 (1), 55–68. <https://doi.org/10.1504/ijex.2005.006433>.
6. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroizdat Publ. 464 (in Russian).
7. Kermeli K., Worrell E., Masanet E. (2011) *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Concrete Industry: Guide for Energy and Plant Managers*. Berkeley, Berkeley National Laboratory University of California Publ. 112. <https://doi.org/10.2172/1062106>.
8. Plank J., Taimasov B. T., Shtefan D., Khirsh K., Zhakipbaev B. E. (2016) *Chemistry of Building Materials*. Shymkent, South Kazakhstan State University named after M. Auezov. 221 (in Russian).
9. Raikhel' V. (1979) *Concrete. Part 1: Properties. Design. Testing*. Moscow, Stroizdat Publ. 111 (in Russian).
10. Bazhenov Y. M. (2002) *Technology of Concrete*. Moscow, ASV Publ. 500 (in Russian).
11. Fridrikhsberg D. A. (1984) *Colloid Chemistry Course*. 2nd ed. Leningrad, Khimiya Publ. 368 (in Russian).
12. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energiya Publ. 296 (in Russian).
13. Brodyanskii V. M., Sorin M. V. (1985) Principles for Determining the Efficiency of Technical Systems for Energy and Substance Conversion. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii SSSR. Energetika* [Proceedings of Higher Educational Institutions of the USSR. Energy], (1), 60–65 (in Russian).
14. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K. (1998) *The Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
15. Romanyuk V. N. (2010) *Intensive Energy Saving in Heat-Technological Systems of Industrial Production of Building Materials*. Minsk. 365 (in Russian).
16. Zimon A. D. (1974) *Adhesion of Fluid and Wetting*. Moscow, Khimiya Publ. 416 (in Russian).
17. Stepanov V. S. (1990) *Chemical Energy and Exergy of Substances*. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch. 163 (in Russian).

18. Kuznetsova I. N., Rashchupkina M. A., Kosach A. F., Gutareva N. A. (2012) *The Hydraulic Binders*. Omsk, SibADI Publ. 74 (in Russian).
19. Brykov A. S. (2008) *Hydration of Portland Cement*. St.-Petersburg, Saint-Petersburg State Institute of Technology Publ. 30 (in Russian).
20. Sadrasheva A. O. (2016) Calcium Hydrosilicates (C–S–H) as the Main Phase of Hardening of Portland Cement. *Polzunovskii Al'manakh* [Polzunov's Almanac], (3), 193–196 (in Russian).
21. de Bruyne N. A., Houwink R. (1954) *Adhesion and Adhesives*. London, Cleaver-Hume Press. 516.
22. Usov B. A. (2016) *Chemicalization of Concrete*. Moscow, INFRA-M Publ. 379 (in Russian).
23. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Improving the Energy Efficiency of Heat-Technical Equipment on the Basis of Numerical Simulation of Non-Stationary Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191> (in Russian).
24. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yaczkevich Yu. V. (2019) Verification of Non-Stationary Mathematical Model of Concrete Hardening in Thermal Technological Installations. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (2), 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145> (in Russian).
25. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Discrete Optimization of Software-Controlled Modes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat-Technological Facilities. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292> (in Russian).
26. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) The Method of Calculation of the Evolution of Thermal and Energy Characteristics of the Accelerated Hydration Process of Concrete Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324> (in Russian).
27. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) Unsteady Model of the Hydration Process of a Reinforced Concrete Product at Software-Controlled Heating. *Doklady Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 63 (4), 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286>

УДК 628.12

Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования

В. В. Ивашечкин¹⁾, В. И. Крицкая¹⁾, В. Н. Ануфриев¹⁾, О. А. Аврутин²⁾

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

²⁾УП «Минскводоканал» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Снижение напорной характеристики погружного насоса в процессе эксплуатации происходит в результате совокупного действия ряда причин. Насосное оборудование изнашивается вследствие гидроабразивного разрушения проточных каналов. Снятие характеристик погружных насосов производится в заводских условиях на специальных стендах. На крупных групповых водозаборах подземных вод скважины оборудованы автоматизированной системой управления, позволяющей тестировать насос на рабочем месте и оперативно принимать решение о его замене при недопустимом снижении напорной характеристики. Фактическую напорную характеристику насоса $H^H = f(Q)$ с достаточной степенью точности можно построить непосредственно на скважине. Для определения степени износа насоса производится сравнение его напорных характеристик до установки и в момент снятия показаний. В статье описана схема обвязки скважины для измерения удельного дебита и напорной характеристики погружного насоса. Цель исследования – вывести зависимость для построения расходно-напорной характеристики погружного насоса на его рабочем месте и разработать методику учета его износа в процессе работы, позволяющую прогнозировать снижение производительности скважин во времени. Предложено выражение для описания напорной характеристики насоса в любой момент времени, исчисляемый от его установки в скважину. Приведен анализ снижения напорных характеристик насосов различных производителей на скважинах действующего водозабора подземных вод. Подтверждено, что интенсивность снижения напора зависит от продолжительности эксплуатации насоса на данной скважине, материала рабочих колес насоса и содержания песка в перекачиваемой воде.

Ключевые слова: погружной насос, снижение напорной характеристики, износ скважинного насоса, испытание насоса на рабочем месте, манометр

Для цитирования: Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования / В. В. Ивашечкин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286>

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67/2,
220065, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
67/2, Nezavisimosty Ave.,
220065, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Methodology for Analyzing the Actual Technical Condition of Downhole Pumping Equipment

V. V. Ivashchkin¹, V. I. Krytskaya¹, V. N. Anufriev¹, O. A. Avrutin²

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

²UE "Minskvodokanal" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The reducing in the pressure characteristic of the submersible pump during operation occurs as a result of the combined action of a number of reasons. Pumping equipment wears out due to waterjet destruction of flow channels. The characteristics of submersible pumps are captured at the factory on special stands. At large group groundwater intakes, wells are equipped with an automated control system that allows testing the pump at the workplace and promptly making a decision on its replacement if the pressure characteristic is unacceptably reduced. The actual pressure characteristic of the pump $H^H = f(Q)$ can be plotted directly in the well with a sufficient degree of accuracy. To determine the degree of wear of the pump, its pressure characteristics are compared before installation and at the time of taking readings. The article describes a well strapping scheme for measuring the specific flow rate and pressure characteristics of a submersible pump. The purpose of the study is to derive a dependency for constructing the flow-pressure characteristics of a submersible pump at its workplace and to develop a method for accounting for its wear during operation, which allows predicting a decrease in well productivity over time. An expression is proposed to describe the characteristics of the pump at any time, calculated from its installation in the well. The analysis of the reducing in the pressure characteristics of pumps produced by various manufacturers in the wells of the existing water intake of underground water is presented. It is confirmed that the intensity of the pressure reduction depends on the duration of the pump operation in a given well, the material of the pump impellers and the sand content in the pumped water.

Keywords: submersible pump, pressure reduction, downhole pump wear, pump test at the workplace, pressure gauge

For citation: Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I., Anufriev V. N., Avrutin O. A. (2021) Methodology for Analyzing the Actual Technical Condition of Downhole Pumping Equipment. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286> (in Russian)

Введение

Снижение напорной характеристики погружного насоса происходит в результате совокупного действия ряда причин (абразивный износ колес, увеличение зазоров между рабочим колесом и направляющим аппаратом и т. д.). Насосное оборудование изнашивается вследствие гидроабразивного разрушения проточных каналов. Согласно [1–8], погружной насос может терять ежемесячно 2–3 % первоначальной производительности вследствие физического износа деталей. Причем насосы, прошедшие один или несколько капитальных ремонтов, изнашиваются больше, чем новые.

Кривые изменения производительности насосов скважин во времени, обусловленного износом погружных насосов, показаны на рис. 1 [1].

Анализ кривых подтверждает, что интенсивность снижения дебита скважин с новыми насосами ниже, чем скважин с насосами после ремонта.

Процесс уменьшения дебита скважины при износе насоса проиллюстрирован на рис. 2. Напорно-расходная характеристика насоса перемещается из положения 4 в 5, тогда как характеристики скважины 1 и трубопровода 2, а также их суммарная характеристика 3 остаются неизменными. Рабочая точ-

ка A_1 смещается влево по кривой 3 в положение A_2 , что приводит к уменьшению подачи насоса, а значит, и фактического дебита скважины ($Q_{A2} < Q_{A1}$).

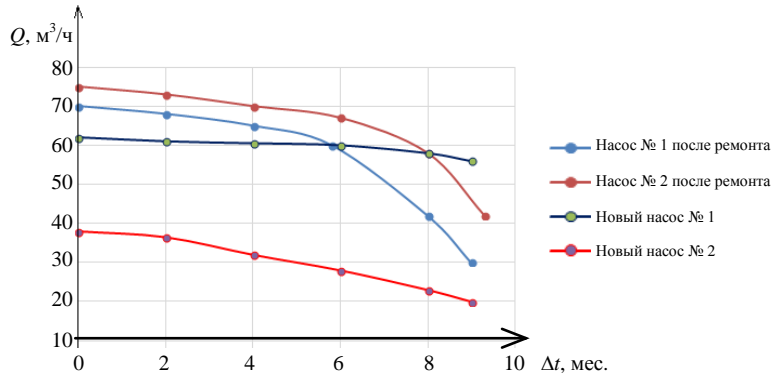


Рис. 1. Графики изменения производительности насосов скважин вследствие их износа

Fig. 1. Graphs of well pumps productivity over time due to its wear

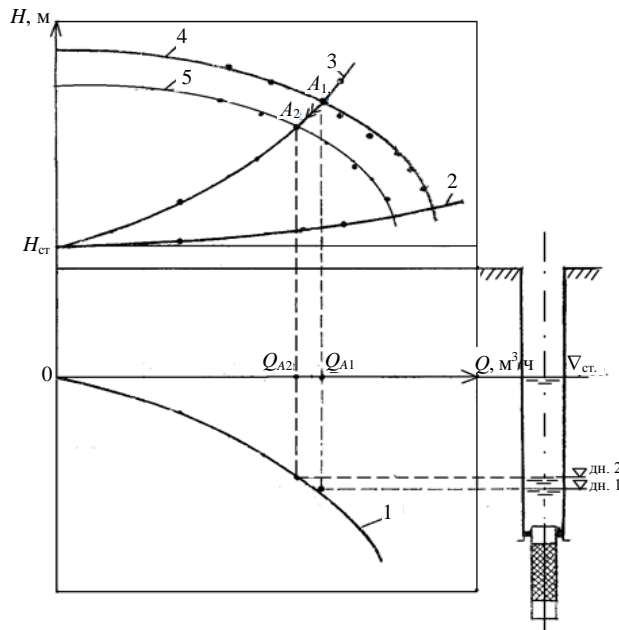


Рис. 2. Гидравлические характеристики: 1 – скважины; 2 – трубопровода; 3 – скважины и трубопровода; 4 – нового насоса; 5 – насоса вследствие износа

Fig. 2. Hydraulic characteristics of: 1 – well; 2 – pipeline; 3 – well and a pipeline; 4 – new pump; 5 – reduced pump performance due to wear

Как показывает опыт эксплуатации скважинных насосов различных производителей, около 80 % случаев выхода из строя связаны с поломкой электродвигателя. Кроме того, к снижению ресурса насоса приводит эксплуатация за пределами рабочего диапазона. Поэтому правильный подбор насоса позволяет обеспечить его функционирование в оптимальной точке рабочей характеристики с максимальным КПД и продлевает его срок службы [2].

Снятие характеристик погружных насосов производится в заводских условиях на специальных стендах согласно требованиям ГОСТ 6134 [9]. Давление измеряется манометром, установленным на выходе из водоподъемной трубы. Одновременно измеряются динамический уровень в колонне и подача воды водомером на напорном трубопроводе. ГОСТ 6134 также предусматривает возможность проведения приемочных испытаний насоса на рабочем месте с целью подтверждения его расчетных характеристик. В этом случае насос снабжают всеми необходимыми водоподъемными трубами, опускают в скважину и проводят испытания, оговоренные с покупателем. Потери напора в водоподъемных трубах определяют по формулам гидравлики.

На крупных групповых водозаборах подземных вод скважины оборудованы системой АСУ, предусматривающей установку водомера и двух датчиков давления (на устье и входе в линию подключения скважины к сборному водоводу), обеспечивающих мониторинг давления и расхода воды, подаваемой насосом в сборный водовод. Кроме этого, в стволе скважины смонтирован датчик, предназначенный для определения статического и динамического уровней воды. Дополнительно контролировать положение уровней можно с помощью электро- или пневмоуровнемера. Перечисленных приборов достаточно для тестирования насоса на рабочем месте и принятия решения о его замене при недопустимом снижении напорной характеристики. Фактическую напорную характеристику насоса $H^H = f(Q)$, показывающую степень его износа, с достаточной точностью можно построить непосредственно на скважине. Это позволит сэкономить время на демонтаж насоса, его транспортировку на испытательный стенд для тестирования.

Цель настоящей работы – вывести зависимость для построения расходно-напорной характеристики погружного насоса на скважине и разработать методику учета его износа в процессе работы.

Основная часть

Типичная схема обвязки скважины группового водозабора подземных вод, подающей воду на станцию обезжелезивания, представлена на рис. 3, где H – статический уровень воды, м; H_d – динамический уровень воды, м; S – понижение, м; $l_{тр}$ – длина трубки пневмоуровнемера, м; h' – расстояние от плиты оголовка до оси линии подключения, м; $h_{загл}$ – заглубление насоса под динамический уровень воды в скважине, м; h_n – высота насосной части агрегата, м. Насосная установка в достаточной степени укомплектована запорно-регулирующей арматурой (обратный клапан, задвижка) и контрольно-измерительной аппаратурой (манометры, датчики давления, водомер).

Напор H^H погружного насоса при снятии фактической напорной характеристики $H^H = f(Q)$ на рабочем месте найдем как разность полных удельных энергий E_1 за насосом в сечении 1–1 и E_3 на входе в насос в сечении 3–3 относительно плоскости сравнения 0–0, проходящей по уровню воды в скважине:

$$H^H = E_1 - E_3 = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \right) - \left(z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha v_3^2}{2g} \right), \quad (1)$$

где z_i – геометрическая высота, м; p_i – пьезометрическое давление; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; α – коэффициент Кориолиса; v_i – скорость движения жидкости в i -м сечении, м/с.

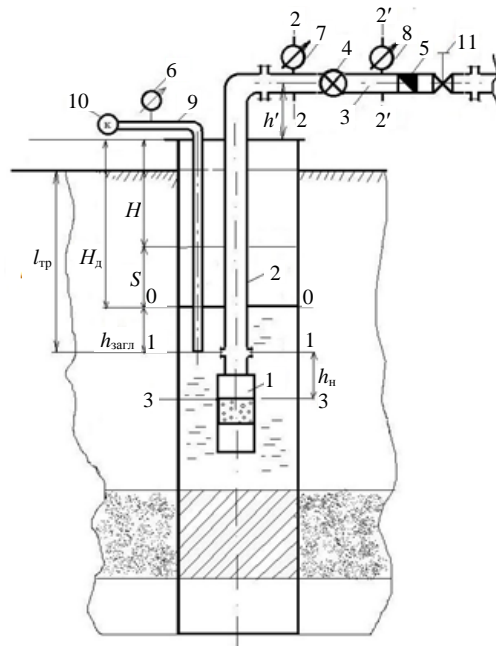


Рис. 3. Схема обвязки скважины для измерения удельного дебита и напорной характеристики погружного насоса: 1 – насос; 2 – водоподъемная труба; 3 – внутрискважинная труба; 4 – водомер; 5 – обратный клапан; 6–8 – манометры; 9 – пневмоуровнемер; 10 – компрессор; 11 – задвижка

Fig. 3. Borehole strapping scheme for measuring the specific flow rate and pressure characteristics of a submersible pump: 1 – pump; 2 – water lifting pipe; 3 – internal pipe; 4 – water meter; 5 – check valve; 6–8 – pressure gauges; 9 – pneumatic level gauge; 10 – compressor; 11 – gate valve

Согласно расчетной схеме (рис. 3) получим:

$$z_1 = -h_{\text{загл}}; p_1 = p_{1\text{ман}}; v_1 = v_{\text{вп}} = \frac{Q}{\omega_{\text{вп}}}; z_3 = -h_{\text{загл}} - h_{\text{н}}; p_3 = p_{\text{вх}}; v_3 = v_{\text{вх}} \approx 0, \quad (2)$$

где $p_{1\text{ман}}$ – манометрическое давление, Па; $v_{\text{вп}}$ – скорость в водоподъемной трубе, м/с; Q – подача насоса, м³/ч; $\omega_{\text{вп}}$ – площадь сечения водоподъемной трубы, м²; $p_{\text{вх}}$ – давление на входе в насос, Па; $v_{\text{вх}}$ – скорость на входе в насос, м/с.

Из рис. 3 следует, что в сечении 3–3 пьезометрическая высота $\frac{p_3}{\rho g}$ численно равна по абсолютной величине геометрической высоте z_3 , но относительно плоскости отсчета 0–0 они имеют разные знаки и их сумма равна нулю

$$z_3 + \frac{p_3}{\rho g} = (-h_{\text{загл}} - h_{\text{н}}) + \frac{p_3}{\rho g} = 0. \quad (3)$$

Чтобы найти давление $p_{1\text{ман}}$ в сечении 1–1, запишем уравнение Д. Бернулли для сечения 1–1 на выходе из насоса и сечения 2–2, проходящего через точку подключения манометра 7, относительно плоскости сравнения 0–0, совпадающей с динамическим уровнем

$$z_1 + \frac{p_{1\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_{2\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h_{\text{тр}1-2}, \quad (4)$$

где $\sum h_{\text{тр}1-2}$ – потери на трение в трубе на участке 1–2.

Тогда согласно схеме (рис. 3) получим:

$$\begin{aligned} z_1 &= -h_{\text{загл}}; p_1 = p_{1\text{ман}}; v_1 = v_{\text{вп}} = \frac{Q}{\omega_{\text{вп}}}; \\ z_2 &= H_{\text{д}} + h'; p_2 = p_{2\text{ман}}; v_2 = v_{\text{вст}} = \frac{Q}{\omega_{\text{вст}}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $v_{\text{вст}}$ – скорость во внутростанционном трубопроводе, м/с; $\omega_{\text{вст}}$ – площадь сечения во внутростанционном трубопроводе, м².

Подставив (5) в (4), получим выражение для пьезометрического напора насоса $\frac{p_{1\text{ман}}}{\rho g}$ в сечении 1–1

$$\frac{p_{1\text{ман}}}{\rho g} = H_{\text{д}} + h_{\text{загл}} + h' + \sum h_{\text{тр}1-2} + \frac{p_{2\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_{\text{вст}}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{\text{вп}}^2}{2g}. \quad (6)$$

После подстановки (2), (3), (6) в (1) и преобразований получим выражение для напора насоса

$$H^{\text{н}} = H_{\text{д}} + h' + \sum h_{\text{тр}1-2} + \frac{p_{2\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_{\text{вст}}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{\text{вп}}^2}{2g}. \quad (7)$$

Потери напора $\sum h_{\text{тр}1-2}$ на участке 1–2 складываются из потерь по длине $h_{\text{дл}}$ и на местных сопротивлениях $h_{\text{м}}$

$$\sum h_{\text{тр}1-2} = h_{\text{дл}} + h_{\text{м}} = A_{\text{вп}} l_{\text{вп}} Q^2 + \zeta_{\text{пов}} Q^2 / (2g \omega_{\text{вст}}^2), \quad (8)$$

где $A_{\text{вп}}$ – удельное сопротивление водоподъемной трубы; $l_{\text{вп}}$ – длина водоподъемной трубы, м; $\zeta_{\text{пов}}$ – коэффициент местного сопротивления поворота внутростанционного трубопровода, принимается по справочнику [10].

В случае, если манометр 7 в сечении 2–2 отсутствует, а есть манометр 8 в сечении 2'–2', в расчете напора насоса $H^{\text{н}}$ необходимо учесть потери напора на водомере $h_{\text{вод}}$ (зависят от расхода $h_{\text{вод}} = f(Q)$, определяются по заводским паспортным характеристикам)

$$H^{\text{н}} = H_{\text{д}} + h' + \sum h_{\text{тр}1-2'} + h_{\text{вод}} + \frac{p_{2'\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_{\text{вст}}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{\text{вп}}^2}{2g}. \quad (9)$$

Если зазоры между фланцами (муфтами) водоподъемных труб слишком малы для спуска электрода электроуровнемера, динамический уровень воды $H_{\text{д}}$ определяют с помощью пневмоуровнемера (рис. 3). Он представляет собой пластиковую трубку с внутренним диаметром порядка 8 мм. Нижний конец трубки жестко закреплен на водоподъемной трубе выше насоса, а верхний выведен на оголовок скважины. При замере уровня воды в сква-

жине к верхнему концу подключают компрессор или ручной пневмонасос с манометром и подают в трубку воздух, наблюдая за положением стрелки манометра на выходе пневмонасоса. Максимальное давление p_{\max}^* фиксируют. Динамический уровень вычисляют по формуле

$$H_d = l_{\text{тр}} - h_{\text{загл}} = l_{\text{тр}} - p_{\max}^* / \rho g. \quad (10)$$

Аналогично определяют положение статического уровня H при выключенном насосе.

Для построения напорной характеристики насоса ступенчато изменяют его подачу с помощью задвижки и фиксируют показания манометра в сечении 2–2 или 2'–2', водомера, пневмоуровнемера (рис. 3). Напор насоса вычисляют по формулам (7) или (9).

Для оценки степени снижения напорной характеристики насоса в результате износа в общей координатной сетке наносят характеристику $H_0^H = f(Q)$, снятую на заводе-изготовителе (паспортную характеристику, если насос новый) или на стенде ремонтных мастерских эксплуатирующей организации (если насос после ремонта) перед установкой на скважину. Затем ее сравнивают с характеристикой насоса $H_{\text{обсл}}^H = f(Q)$, снятой на рабочем месте. Если $H_{\text{обсл}}^H = f(Q)$ ниже $H_0^H = f(Q)$, имеет место некоторый износ насоса.

В статье проанализированы насосы, установленные на скважинах водозабора № 2 «Петровщина» г. Минска.

Напорные характеристики погружного насоса Wilo-EMU K85-3+NU501-2/22, установленного на скважине № 4в, представлены на рис. 4. Насос повергался испытаниям: 03.10.2018 – на гидравлическом стенде в ремонтно-механическом цехе (РМЦ) УП «Минскводоканал» (кривая 1); 28.05.2019 – на рабочем месте по предлагаемой методике (кривая 2); 30.08.2019 – на том же гидравлическом стенде (кривая 3).

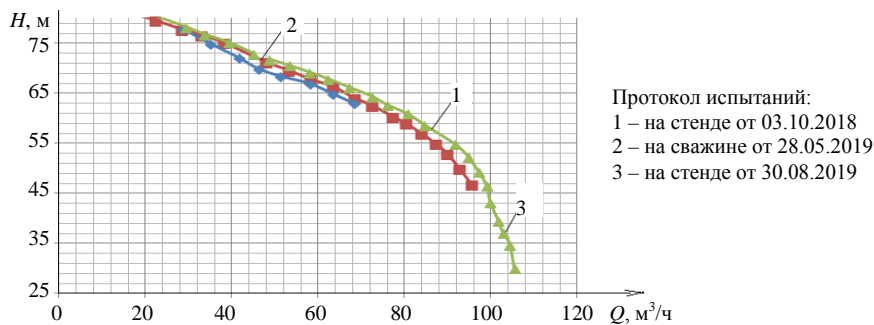


Рис. 4. Графики напорных характеристик насоса Wilo-EMU K85-3+NU501-2/22 на скважине № 4в

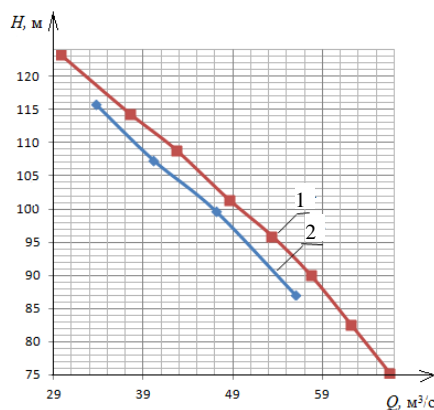
Fig. 4. Graphs of the pressure characteristics of the Wilo-EMU K85-3+NU501-2/22 pump at the well No 4c

Таким образом, расхождение графиков напорных характеристик составляет не более 1,5 м. Это значит, что методика испытаний насоса в скважине может использоваться эксплуатирующей организацией.

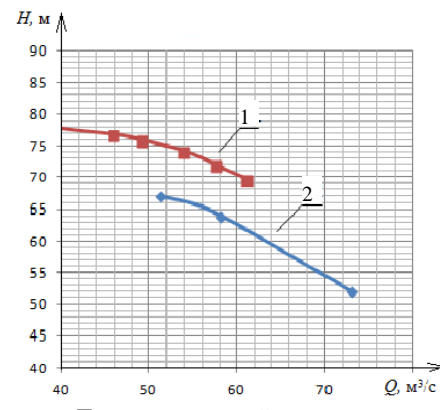
Снижение напорных характеристик погружных насосов вследствие износа представлено на рис. 5.

Погружной насос SAER SPC151-B/9 (производство Италия), оснащенный чугунными рабочими колесами, установлен на скважине № 8а (рис. 5). Повергался испытаниям: 17.07.2014 – на гидравлическом стенде в РМЦ УП «Минскводоканал» перед установкой на скважину (кривая 1); 21.05.2019 – на рабочем месте по предлагаемой методике (кривая 2). Анализ кривых показывает, что за 4 года и 10 месяцев напорная характеристика снизилась на 4,5 м.

Погружной насос ЭЦВ 10-65-65 (производство г. Ливны) с рабочими колесами из нержавеющей стали установлен на скважине № 12б (рис. 6). Повергался испытаниям: 09.02.2018 – на гидравлическом стенде в РМЦ УП «Минскводоканал» перед установкой на скважину (кривая 1); 19.06.2019 – на рабочем месте по предлагаемой методике (кривая 2). Анализ положения кривых показывает, что за 1 год и 4 месяца напорная характеристика снизилась на 8 м.



Протокол испытаний:
1 – на стенде от 17.07.2014
2 – на скважине от 21.05.2019



Протокол испытаний:
1 – на стенде от 09.02.2018
2 – на скважине от 19.06.2019

Рис. 5. Графики напорных характеристик насоса SPC151-B/9 на скважине № 8а

Fig. 5. Graphs of the pressure characteristics of the SPC151-B/9 pump in the well No 8a

Рис. 6. Графики напорных характеристик насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважине № 12б

Fig. 6. Graphs of the pressure characteristics of the ECV 10-65-65 pump in the well No 12b

Напорные характеристики погружного насоса ЭЦВ 10-65-65, установленного на скважине № 10в, представлены на рис. 7. Повергался испытаниям: 31.08.2018 – на гидравлическом стенде в РМЦ УП «Минскводоканал» перед установкой на скважину (кривая 1); 17.05.2019 – на рабочем месте по предлагаемой методике (кривая 2).

Аппроксимируем кривую 1 (рис. 7) полиномиальной зависимостью вида

$$H_0^n = c - aQ^2 - bQ, \quad (11)$$

где c – некоторый фиктивный напор насоса; a , b – коэффициенты кривой, характеризующие фиктивное гидравлическое сопротивление.

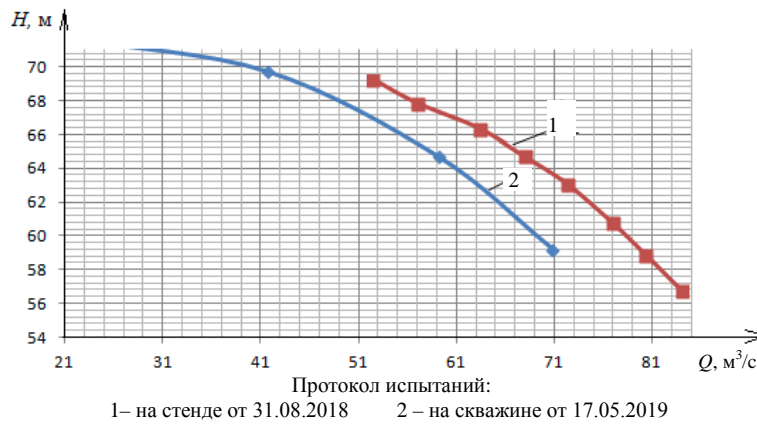


Рис. 7. Графики напорных характеристик насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважине № 10в
 Fig. 7. Graphs of the pressure characteristics of the ECV 10-65-65 pump in the well No 10с

Определяют амплитуду снижения напора $\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}}$ как среднее арифметическое значений расстояний по вертикали ΔH_i^{H} между указанными характеристиками при нескольких расходах Q_i в зоне максимальных КПД

$$\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}} = \frac{\sum_i^n \Delta H_i^{\text{H}}}{n}. \quad (12)$$

Тогда выражение для характеристики насоса $H_{\text{обсл}}^{\text{H}}$ на момент обследования можно представить в виде

$$H_{\text{обсл}}^{\text{H}} = \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}}}{c} \right) c - aQ^2 - bQ. \quad (13)$$

Снижение напора $\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}}$, характеризующее износ насоса, зависит от продолжительности его эксплуатации на данной скважине. На другой скважине интенсивность снижения напора может быть иной в силу различий в химическом составе подземных вод, содержании песка в перекачиваемой воде, частоте включений насоса и т. д. [10].

При наличии данных наблюдений в различные моменты времени за снижением напорной характеристики насоса можно получить эмпирическую зависимость $\Delta H^{\text{H}} = f(t)$ вида

$$\Delta H_i^{\text{H}} = \Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}} e^{\psi t}, \quad (14)$$

где ψ – коэффициент интенсивности снижения напора насоса, зависящий от его марки (для определения ψ необходимо провести не менее двух обследований).

Это дает возможность делать прогноз изменения напорной характеристики насоса через заданный промежуток времени t , отсчитываемый от момента обследования. Тогда с учетом (11) и (12) получим

$$H_t^{\text{H}} = \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}} e^{\psi t}}{c} \right) c - aQ^2 - bQ. \quad (15)$$

Фактическое время работы насоса на скважине можно получить из соответствующих отчетов. Так, исходя из данных отчета по работе насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважине № 10в (табл. 1), из теоретически возможных 10224 моточасов он отработал всего 6709. Продолжительность работы в годах определяется по выражению

$$t_{\text{факт}} / 8760 = t, \quad (16)$$

где $t_{\text{факт}}$ – фактическое количество часов работы; 8760 – количество моточасов в одном году.

Данные о работе насосов марки ЭЦВ 10-65-65 на скважинах № 12б и 10в представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные о работе насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважинах № 12б и 10в
Data on the operation of the ECV 10-65-65 pump in the wells No 12b and 10c

Дата	Фактическое количество часов работы $t_{\text{факт}}$		Теоретическое количество часов работы $t_{\text{теор}}$	
	12б	10в	12б	10в
2018 г.				
Март	618	–	744	–
Апрель	598	–	720	–
Май	676	–	744	–
Июнь	281	–	720	–
Июль	76	–	744	–
Август	273	–	744	–
Сентябрь	120	217	720	720
Октябрь	17	207	744	744
Ноябрь	50	429	720	720
Декабрь	369	636	744	744
2019 г.				
Январь	190	611	744	744
Февраль	31	299	672	672
Март	17	352	744	744
Апрель	20	330	720	720
Май	391	533	744	744
Июнь	428	604	720	720
Июль	236	680	744	744
Август	134	417	744	744
Сентябрь	145	699	720	720
Октябрь	640	695	744	744
Всего	5310	6709	14640	10224

Исходя из данных табл. 1, продолжительность работы насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважине № 10в составляет 0,77 года; на скважине № 12б – 0,61 года.

Кроме того, выявлено, что износ указанных насосов не одинаков [11]. Так, напорная характеристика насоса на скважине № 10в за 0,77 года снизилась на 4 м; насоса на скважине № 12б за 0,61 года – на 8 м. Большая степень износа вызвана тем, что скважина № 12б некоторое время песковала.

Фактическое снижение КПД насосов определялось по формуле

$$\eta_n = \frac{N_{\text{пол}}}{N_{\text{потр}}} \cdot 100 \% = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{дв}} \sqrt{3} I U \cos \varphi} \cdot 100 \%, \quad (17)$$

где $N_{\text{пол}}$, $N_{\text{потр}}$ – полезная и потребляемая мощности насоса соответственно, Вт; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя; I – сила тока, А; U – напряжение, В; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Полезную мощность определяли по снятой на скважине напорной характеристике насоса, потребляемую – по данным АСУ водозабора.

Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные расчетов степени снижения КПД насосов модели ЭЦВ 10-65-65
 на скважинах № 10в и 12б

Data of the calculation of the degree of decrease in efficiency of ECV 10-65-65
 pumps in the wells No 10c and 12b

Номер скважины	Дата замеров	Подача насоса Q , м ³ /ч	Динамический уровень $H_{\text{дв}}$, м	Полезная мощность насоса $N_{\text{пол}}$, Вт	Потребляемая мощность насоса $N_{\text{потр}}$, Вт	КПД двигателя $\eta_{\text{дв}}$, %	Степень снижения КПД, %
10в	31.08.18	63,33	66,37	11,72	21,15	55,40	31,8
	17.05.19	72,33	59,00	10,49	27,80	37,73	
12б	09.02.18	65,23	66,03	11,44	22,74	50,31	44,6
	19.06.19	67,60	57,00	11,62	41,70	27,87	

ВЫВОДЫ

1. Получена аналитическая зависимость для определения напора погружного насоса, установленного в водозаборной скважине, и разработана методика снятия энергетических характеристик насоса на его рабочем месте.

2. Приведен анализ снижения напорных характеристик насосов различных производителей на скважинах действующего водозабора подземных вод. Подтверждено, что интенсивность снижения напора зависит от продолжительности эксплуатации насоса на данной скважине, материала рабочих колес насоса и содержания песка в перекачиваемой воде.

3. Разработана методика учета износа погружных насосов с целью прогноза снижения производительности скважин в процессе работы. Предложено выражение для описания характеристики насоса H_t^n в любой момент времени, исчисляемый от его установки в скважину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тугай, А. М. Водоснабжение из подземных источников / А. М. Тугай, И. Т. Прокопчук. Киев: Урожай, 1990. 264 с.
2. Наладка и интенсификация работы городских систем подачи и распределения воды / И. В. Кожин [и др.]. М.: Стройиздат, 1978. 112 с.
3. Кикачейшвили, Г. Е. Методология оптимизации систем подачи и распределения воды / Г. Е. Кикачейшвили. Тбилиси: Техн. ун-т, 2002. 180 с.
4. Карамбиров, С. Н. Совершенствование методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации / С. Н. Карамбиров. М., 2005. 46 с.

5. Верemenюк, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>.
6. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение / Н. Н. Абрамов. М.: Стройиздат, 1982. 440 с.
7. Эгильский, И. С. Основные направления интенсификации работы городских систем подачи и распределения воды / И. С. Эгильский, И. В. Кожин // Интенсификация и оптимизация городских и промышленных водопроводов: материалы семинара. М.: МДНТИ имени Ф. Э. Дзержинского, 1973. С. 3–9.
8. Рекомендации по сокращению потерь воды в жилищном хозяйстве. М.: ОНТИ АКХ, 1977. 27 с.
9. Насосы динамические. Методы испытаний: ГОСТ 6134–2007 (ИСО 9906:1999). М.: Стандартинформ, 2008.
10. Федоров, Н. Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / Н. Ф. Федоров, А. М. Курганов. Л.: Стройиздат, 1973.
11. 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. Верemenюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92>.

Поступила 03.06.2020 Подписана в печать 11.08.2020 Опубликовано онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Tugai A. M., Prokopchuk I. T. (1990) *Water Supply from Underground Sources*. Kiev, Urozhai Publ. 264 (in Russian).
2. Kozhiniv I. V., Kolesov V. V., Maizel's M. P., Egil'skii I. S. (1978) *Commissioning and Intensification of Urban Water Supply and Distribution Systems*. Moscow, Stroizdat Publ. 112 (in Russian).
3. Kikacheishvili G. E. (2002) *Methodology of Optimization of Water Supply and Distribution Systems*. Tbilisi, Technical University. 180 (in Russian).
4. Karambirov S. N. (2005) *Improvement of Methods for Calculating Water Supply and Distribution Systems in Conditions of Multiple Modes and Incomplete Initial Information*. Moscow. 46 (in Russian).
5. Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580> (in Russian).
6. Abramov N. N. (1982) *Water Supply*. Moscow, Stroizdat Publ. 440 (in Russian).
7. Egil'skii I. S., Kozhinov I. V. (1973) Main Directions of Intensification of Urban Water Supply and Distribution Systems. *Intensification and Optimization of Urban and Industrial Water Pipes: Workshop Proceedings*. Moscow, Moscow House of Scientific and Technical Popularization named after F. E. Dzerzhinskii. 3–9 (in Russian).
8. *Recommendations for Reducing Water Losses in Housing*. Moscow, 1977. 27 (in Russian).
9. State Standart 6134–2007 (ISO 9906:1999) *Dynamic Pumps. Test Methods*. Moscow, Standartinform Publ. 2008 (in Russian).
10. Fedorov N. F., Kurganov A. M. (1973) *Handbook of Hydraulic Calculations of Water Supply and Sewerage Systems*. Leningrad, Stroizdat Publ.
11. Ivanova I. E., Ivashchkin 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 80–92. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92> (in Russian).

Received: 3 June 2020

Accepted: 11 August 2020

Published online: 31 May 2021