

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 65, № 3
2022

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

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.** Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах 197
- Доброго К. В., Козначеев И. А.** Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при стабильной нагрузке 209
- Менжинский А. Б., Пантелеев С. В., Малашин А. Н.** Разработка аналитической модели для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой 224

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Sednin A. V., Zherelo A. V.** An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System
(Седнин А. В., Жерело А. В. О подходе к обработке данных для интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения) 240
- Володин В. И., Здитовская С. В.** Приближенный тепловой расчет конденсатора перегретого пара тепловых насосов 250
- Овсянник А. В., Ключинский В. П.** Тригенерационные турбоустановки на основе низкикипящих рабочих тел 263

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Ивашечкин В. В., Богославчик П. М., Верменюк В. В., Немеровец О. В.** Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень 276

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 (Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
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. 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. ПИСЬМЕННЫЙ (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),
Г. Н. УЗАКОВ (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (РУП «Белинвестэнергосбережение», Минск, Республика Беларусь)

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 31.05.2022. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2022. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.
Тел.: +375 17 320-65-14
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, 2022

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 65, No 3
2022

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.** Compensation of Dynamic Phase Error in the Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protections 197
- Dobrego K. V., Koznacheev I. A.** Symmetric Resonance Mechanism for Elimination of Parasitic Torque of a Permanent Magnet Generator under Stable Load 209
- Menzhinski A. B., Panteleev S. V., Malashin A. N.** Development of an Analytical Model for Determining the Magnetic Flux of Scattering through the Gears of the Stator of a Synchronous Electric Machine with a Fractional Gear Winding.. 224

HEAT POWER ENGINEERING

- Sednin A. V., Zherelo A. V.** An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System 240
- Volodin V. I., Zditovetskaya S. V.** Approximate Thermal Calculation of the Superheated Steam Condenser of Heat Pumps 250
- Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P.** Trigenation Turbine Units Based on Low Boiling Working Fluids.. 263

HYDRAULIC POWER ENGINEERING

- Ivashechkin V. V., Bohaslauchyk P. M., Veremenyuk V. V., Nemeravets O. V.** Theoretical Foundations for Calculating the Erosion of Soil Dams during Overflow of Water over the Ridge 276

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 (*Institute of Energetics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*) (Deputy Editor-in-Chief),
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. 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*),
G. N. UZAKOV (*Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan*),
B. M. KHROUSTALEV (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
L. V. SHENETS (*RUE “Belinvestenergosberezhenie”, Minsk, Republic of Belarus*)

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 31.05.2022. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 100 copies. Date of publishing 2022. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 320-65-14
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, 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208>

УДК 621.316.925

Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В микропроцессорных защитах электроэнергетических систем определение контролируемых информационных параметров входных сигналов осуществляется с использованием их ортогональных составляющих. Для формирования указанных составляющих наиболее широко применяются цифровые фильтры Фурье, которые обладают инерционностью. Вследствие этого переходные режимы формирования ортогональных составляющих сопровождаются появлением динамической погрешности. Она состоит из динамических амплитудной и фазовой погрешностей, которые могут существенно влиять на функционирование соответствующих измерительных органов и создавать возможность для их излишних срабатываний при внешних коротких замыканиях и замедления срабатывания при внутренних коротких замыканиях. Снижение влияния указанных факторов на поведение измерительных органов обеспечивается использованием для выделения ортогональных составляющих быстродействующих формирователей, а также посредством компенсации динамической фазовой погрешности. Предлагаемый метод основывается на получении ортогональных составляющих Фурье с последующим определением по их выборкам расчетных составляющих, которые совпадают или сдвинуты по фазе относительно первых соответственно в установившемся и переходном режимах. По выборкам расчетных ортогональных составляющих Фурье вычисляются результирующие ортогональные составляющие с минимальными динамическими фазовыми погрешностями. Оценка эффективности предложенного решения выполнялась методом вычислительного эксперимента с помощью цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink. При этом в качестве тестовых воздействий использовались как синусоидальные входные сигналы, так и сложные с содержанием аperiodической составляющей и высших гармоник. В результате исследований установлено, что предлагаемый метод компенсации динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих является работоспособным и эффективным как при синусоидальном, так и при сложном входных сигналах. Разработанный метод компенсации обеспечивает снижение динамической фазовой погрешности цифровых фильтров Фурье в три-четыре раза.

Ключевые слова: микропроцессорная защита, динамическая погрешность, динамическая фазовая погрешность, ортогональные составляющие, цифровые фильтры Фурье, модель, тестовое воздействие, вычислительный эксперимент, MATLAB-Simulink

Для цитирования: Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208>

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

Compensation of Dynamic Phase Error in the Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protections

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

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

Abstract. In microprocessor protections of electric power systems, the controlled information parameters of input signals are determined using their orthogonal components. To form these components, digital Fourier filters which have inertia are most widely used. As a result, transient modes of orthogonal components formation are accompanied by the appearance of a dynamic error. It consists of dynamic amplitude and phase errors, which can significantly affect the functioning of the corresponding measuring elements and cause the possibility of their excessive triggering during external short circuits and slowing down the triggering during internal short circuits. The reduction of the influence of these factors on the behavior of measuring elements is ensured by the use of high-speed shapers to isolate orthogonal components, as well as by compensating for dynamic phase error. The proposed method of forming orthogonal components of a signal with compensation for dynamic phase error is based on obtaining orthogonal Fourier components, followed by determining from their samples the calculated components that coincide or are shifted in phase relative to the orthogonal Fourier components, respectively, in steady-state and transient modes. The resulting orthogonal components with minimal dynamic phase errors are calculated in accordance with samples of calculated orthogonal components and Fourier components. The efficiency of the proposed solution was evaluated by a computational experiment using a digital model implemented in the MATLAB-Simulink dynamic modeling environment. At the same time, both sinusoidal input signals and complex ones with an aperiodic component and higher harmonics were used as test actions. As a result of the studies carried out, it has been found that the proposed method of compensation for dynamic phase error in the formation of orthogonal components is workable and effective for both sinusoidal and complex input signals. The developed compensation method reduces the dynamic phase error of digital Fourier filters by three to four times.

Keywords: microprocessor protection, dynamic error, dynamic phase error, orthogonal components, digital Fourier filters, model, test action, computational experiment, MATLAB-Simulink

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2022) Compensation of Dynamic Phase Error in the Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protections. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208> (in Russian)

Введение

В микропроцессорных защитах электроэнергетических систем определение информационных параметров входных сигналов осуществляется главным образом с использованием их ортогональных составляющих (ОС) [1]. Для формирования ОС в современных защитах преимущественно применяются цифровые фильтры (ЦФ) на основе дискретного преобразования Фурье [2], которые обладают инерционностью. Вследствие этого переходные режимы формирования ОС сопровождаются появлением в них дина-

мической погрешности, изменяющейся с течением времени и исчезающей вообще при наступлении установившегося режима. Указанная погрешность как функция времени представляет собой разность между выходным и входным сигналами формирователя ОС. Она состоит из динамических амплитудной и фазовой погрешностей, которые могут существенно влиять на функционирование соответствующих измерительных органов (ИО) и создавать возможность для их излишних срабатываний при внешних коротких замыканиях и замедления срабатывания при внутренних коротких замыканиях. Для снижения влияния на поведение ИО микропроцессорных защит первого фактора необходимо обеспечить быстрое затухание в переходных режимах динамической амплитудной погрешности за счет использования для выделения ОС быстродействующих формирователей. Принципы реализации и основные характеристики указанных формирователей приведены в [3]. Уменьшение влияния на функционирование ИО второго фактора является задачей более сложной, для решения которой требуется несколько иной подход.

Основная часть

Динамическая фазовая погрешность как функция времени представляет собой разность текущих значений фаз выходного и первой гармоники входного сигналов. Она имеет место в переходном режиме, обусловленном коррекцией амплитуды, текущей фазы либо их одновременным изменением.

При формировании ОС первой гармоники с помощью классических ЦФ Фурье максимальная фазовая погрешность может достигать абсолютного значения 90° [4]. Снижение влияния указанной погрешности на поведение определенных ИО микропроцессорных защит может быть получено за счет отстройки от ее неприемлемых уровней путем введения соответствующего запаздывания в срабатывании органа либо посредством ее компенсации, хотя бы частичной. Второй подход представляется более предпочтительным, поскольку не вызывает ухудшения быстродействия ИО.

Предлагаемый метод формирования ОС сигнала с компенсацией динамической фазовой погрешности основывается на получении ортогональных составляющих Фурье с последующим определением по их выборкам расчетных ОС, которые совпадают или сдвинуты по фазе относительно ОС Фурье соответственно в установившемся и переходном режимах. По выборкам расчетных ортогональных составляющих и ОС Фурье вычисляются результирующие ОС входного сигнала с минимальными динамическими фазовыми погрешностями.

На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема формирователя ОС, в каждом блоке которой осуществляется определенное преобразование сигнала или реализуется математическое выражение в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом.

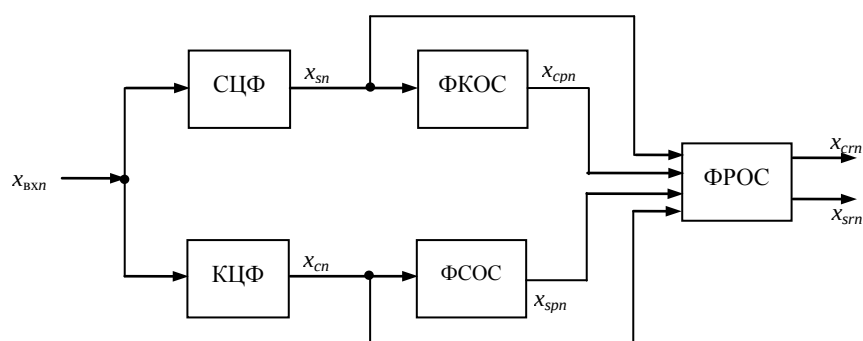


Рис. 1. Упрощенная структурная схема формирования ортогональных составляющих сигнала с компенсацией динамической фазовой погрешности

Fig. 1. Simplified block diagram of the formation of orthogonal components of the signal with compensation of dynamic phase error

Выборки входного сигнала $x_{вхл}$, полученные в результате его обработки, аналоговой фильтрации и аналого-цифрового преобразования, поступают на входы синусного цифрового фильтра (СЦФ) и косинусного цифрового фильтра (КЦФ) Фурье, которые формируют одноименные ОС основной гармоники x_{sn} и x_{cn} согласно выражениям:

$$x_{sn} = \sum_{n=1}^N a_{sn} x_{вхл};$$

$$x_{cn} = \sum_{n=1}^N a_{cn} x_{вхл},$$
(1)

где $x_{вхл}$ – выборка входного сигнала; a_{sn} , a_{cn} – коэффициенты синусного и косинусного ЦФ; $n = 1 \dots N$ – номер выборки входного сигнала в окне наблюдения; N – число используемых выборок.

По смежным выборкам, разделенным шагом дискретизации Δt , синусной ОС x_{sn} и $x_{s(n-1)}$, а также косинусной ОС x_{cn} и $x_{c(n-1)}$, которые подаются на входы соответственно косинусного формирователя ортогональных составляющих (ФКОС) и синусного формирователя ортогональных составляющих (ФСОС), определяются расчетные значения ОС x_{cpn} и x_{spn} :

$$x_{cpn} = \frac{x_{sn} \cos \omega \Delta t - x_{s(n-1)}}{\sin \omega \Delta t};$$
(2)

$$x_{spn} = \frac{x_{c(n-1)} - x_{cn} \cos \omega \Delta t}{\sin \omega \Delta t},$$
(3)

где ω – угловая частота сигнала.

С использованием выборок ОС Фурье x_{sn} , x_{cn} , а также расчетных ОС x_{spn} , x_{cpn} в формирователе результирующих ортогональных составляющих (ФРОС)

определяются синусная x_{srn} и косинусная x_{crn} ОС выходного сигнала по выражениям:

$$\begin{aligned}x_{srn} &= x_{sn} - l_1(x_{sn} - x_{spn}); \\x_{crn} &= x_{cn} - l_2(x_{cn} - x_{cpn}),\end{aligned}\tag{4}$$

где l_1, l_2 – постоянные, являющиеся действительными числами.

В установившемся режиме ввиду отсутствия динамической фазовой погрешности: $x_{sn} = x_{spn}$; $x_{cn} = x_{cpn}$, поэтому результирующие ОС полностью совпадают с ОС Фурье: $x_{srn} = x_{sn}$; $x_{crn} = x_{cn}$. Когда по любой из названных выше причин наступает переходный режим, то $x_{sn} \neq x_{spn}$, $x_{cn} \neq x_{cpn}$ и вследствие появления разностей соответствующих ОС выполняется фазовая коррекция результирующих ОС. Степень этой коррекции можно регулировать путем изменения значений l_1, l_2 .

В конечном итоге благодаря указанной коррекции реализуется компенсация динамической фазовой погрешности текущей фазы выходного сигнала.

Моделирование

Оценка эффективности предложенного решения, обеспечивающего компенсацию динамической фазовой погрешности при формировании ОС входных сигналов, выполнялась методом вычислительного эксперимента с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink [5–7].

В структуре указанной модели содержатся энергосистема, группы трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, нагрузка, блок изменения режима входного сигнала, а также модели элементов, обеспечивающие реализацию процедуры компенсации динамической фазовой погрешности в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1. Входящие в цифровую структуру модели элементы и блоков, а также их компьютерное воспроизведение подробно рассмотрены в [8–11].

Результаты вычислительного эксперимента

Для сравнительной оценки эффективности предложенного метода компенсации получены численные значения динамической фазовой погрешности при тестовом воздействии в форме синусоидального входного сигнала для режимов изменения его амплитуды, а также при одновременном изменении амплитуды и текущей фазы в заданные моменты времени. Соответствующие зависимости, позволяющие дать оценку рассматриваемому методу, представлены на рис. 2, 3. Там же приведены аналогичные зависимости при формировании ОС сигнала ЦФ Фурье.

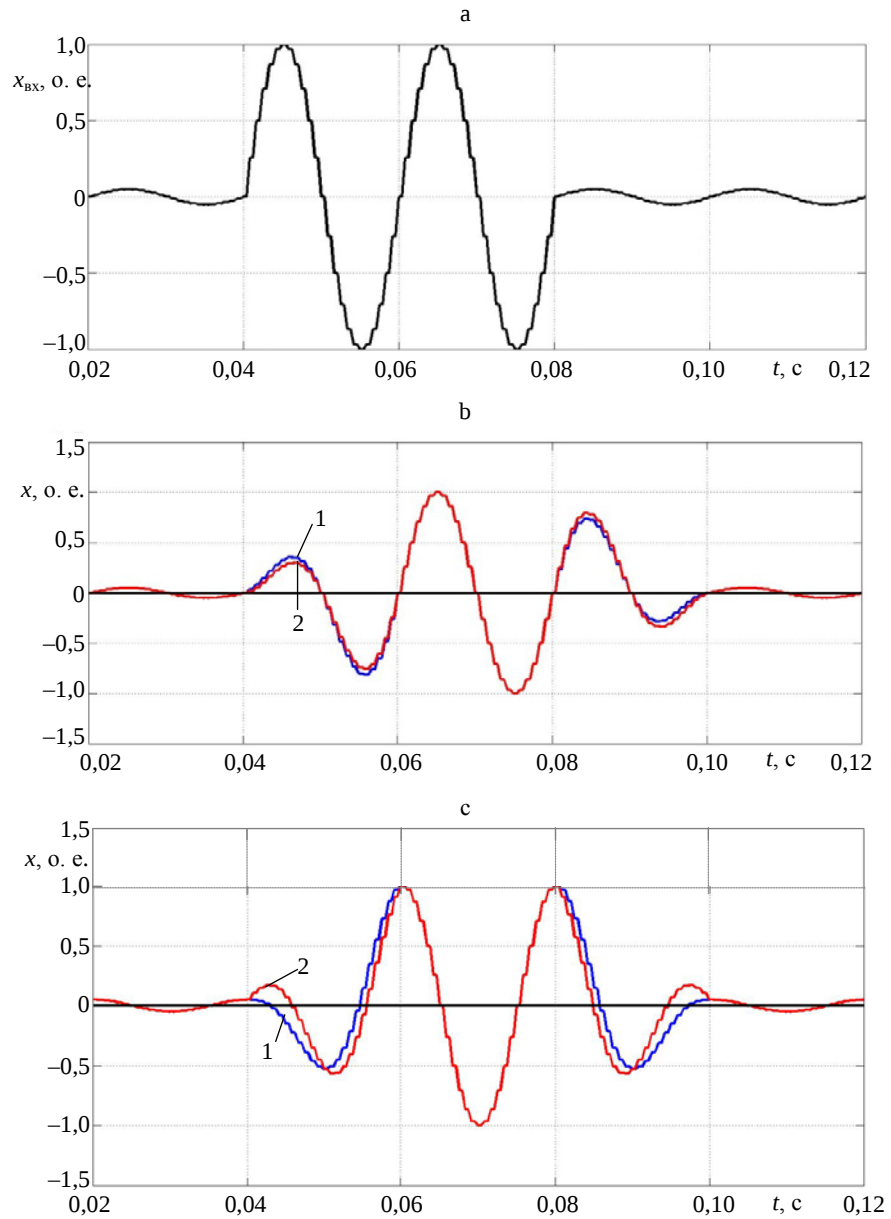


Рис. 2. Результаты компенсации динамической фазовой погрешности при изменении амплитуды входного синусоидального сигнала: а – входной синусоидальный сигнал; б, с – синусные и косинусные ортогональные составляющие, сформированные: 1 – цифровыми фильтрами Фурье; 2 – предложенным методом с компенсацией; д – динамические фазовые погрешности: 1 – цифровых фильтров Фурье; 2 – предложенного метода с компенсацией (окончание рис. на с. 203)

Fig. 2. The results of compensation of dynamic phase error when the amplitude of the input sinusoidal signal changes: а – input sinusoidal signal; б, с – respectively sine and cosine orthogonal components formed by: 1 – digital Fourier filters; 2 – the proposed method with compensation; д – dynamic phase errors of: 1 – digital Fourier filters; 2 – the proposed method with compensation (ending of the Fig. is on p. 203)

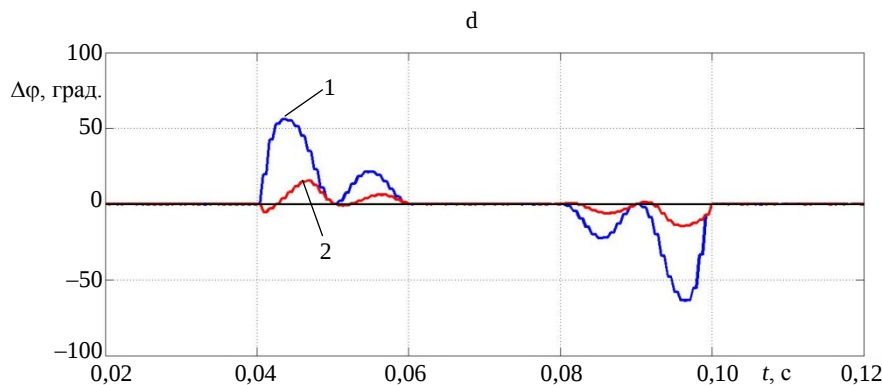


Рис. 2. Окончание

Fig. 2. Ending

В результате выполненных исследований определены оптимальные значения постоянных l_1 , l_2 по критерию минимизации фазовых погрешностей при наступлении переходного режима в различные моменты времени по любой из рассматриваемых причин, находящиеся в диапазонах соответственно 0,70–0,75 и 0,75–0,80.

На рис. 2 показано, как изменяются соответствующие сигналы и величины для вариантов формирования ОС цифровыми фильтрами Фурье (кривые 1) и предложенным методом (кривые 2), при нарастании и спаде входного синусоидального сигнала с кратностью 20. На отрезке времени $t = 0,00–0,04$ с имеет место нормальный установившийся режим входного сигнала $x_{вх}(t)$ (рис. 2а). При этом синусные ОС, сформированные ЦФ Фурье (кривая 1) и предложенным методом (кривая 2), совпадают (рис. 2б). Также совпадают и косинусные ОС, полученные указанными методами (рис. 2с, кривые 1, 2), а динамическая фазовая погрешность $\Delta\varphi$ при этом отсутствует (рис. 2д). Вследствие скачкообразного увеличения в 20 раз в момент времени $t = 0,04$ с амплитуды входного сигнала возникает переходный режим, который длится в течение периода изменения указанного сигнала до $t = 0,06$ с, после чего наступает установившийся аварийный режим. В переходном режиме синусные ОС Фурье и полученные предложенным методом имеют одинаковые амплитуды, но сдвинуты по фазе (рис. 2б). Наличие углового сдвига между ними, который с течением времени изменяется, является признаком действия фазовой компенсации. Аналогичным образом ведут себя и косинусные ОС сравниваемых методов (рис. 2с).

Динамические фазовые погрешности, возникающие в переходном режиме (рис. 2д), для вариантов формирования ОС ЦФ Фурье (рис. 2д, кривая 1) и предложенным методом (рис. 2д, кривая 2) имеют примерно одинаковый характер изменения, но существенно различаются по уровню.

Первому методу присущи более высокие динамические фазовые погрешности с превышением максимальными их значениями аналогичных величин, свойственных для второго метода, в три-четыре раза.

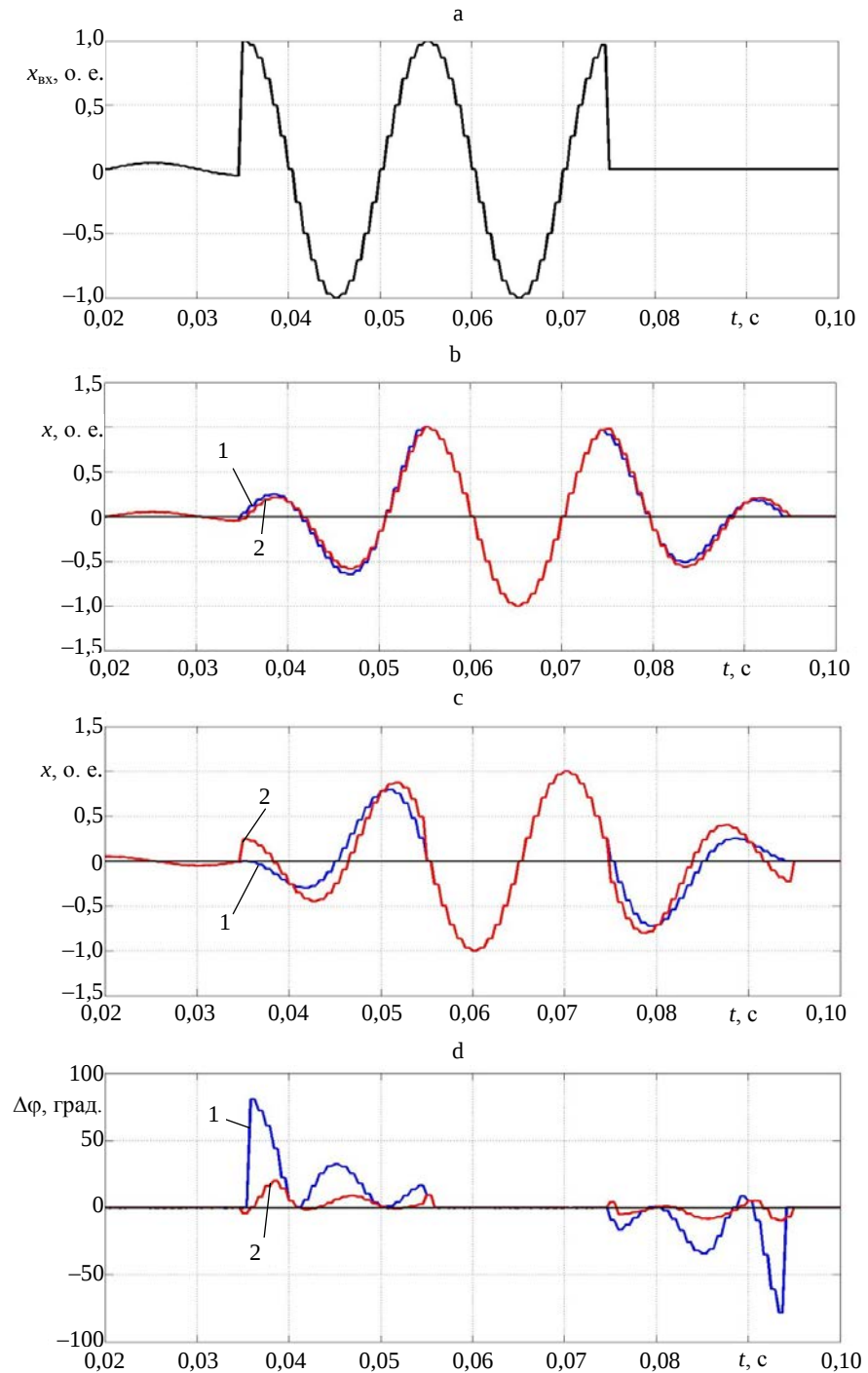


Рис. 3. Результаты компенсации динамической фазовой погрешности при изменении амплитуды и текущей фазы входного синусоидального сигнала: а–д, 1, 2 – то же, что на рис. 2

Fig. 3. The results of compensation of the dynamic phase error when changing the amplitude and current phase of the input sinusoidal signal: а–д, 1, 2 – the same as in Fig. 2

В момент времени $t = 0,08$ с происходит скачкообразное снижение амплитуды входного сигнала до уровня нормального режима и возникает переходный процесс, обусловленный спадом сигнала, который заканчивается при $t = 0,1$ с. При этом анализируемые сигналы и величины изменяются с сохранением закономерностей, как и при нарастании входного синусоидального сигнала $x_{вх}(t)$ (рис. 2а). Динамические фазовые погрешности приобретают отрицательный знак, а соотношения между ними для анализируемых методов формирования ОС сохраняются. После завершения переходного процесса при $t > 0,1$ с указанные погрешности исчезают.

На рис. 3 показаны, как и на рис. 2, зависимости для режимов нарастания и спада входного синусоидального сигнала с одновременным увеличением в момент скачкообразного изменения амплитуды указанного сигнала и его текущей фазы на угол π .

Анализ представленных зависимостей позволяет отметить, что отличительной особенностью исследуемого режима являются более высокие уровни динамической фазовой погрешности с сохранением в основном характера изменений и соотношений оцениваемых величин.

Эффективность и качество функционирования предложенного метода компенсации динамической фазовой погрешности также оценивались на основе анализа изменений соответствующих сигналов и величин при тестовых воздействиях в форме сложных входных токов.

На рис. 4 представлены наиболее характерные результаты, включающие изменяющиеся во времени значения текущей фазы φ основной гармоники (рис. 4б), динамической фазовой погрешности $\Delta\varphi$ (рис. 4с) для вариантов формирования ОС ЦФ Фурье (кривая 1) и разработанным методом (кривая 2) при скачкообразном изменении входного тока $i_{вх}$ (рис. 4 а), содержащем в аварийном режиме, помимо основной, апериодическую составляющую и спектр высших гармоник, что соответствует максимально-му приближению $i_{вх}$ к реальному вторичному току короткого замыкания.

На отрезке времени $t = 0,00-0,04$ с существует нормальный установившийся режим. При этом текущие фазы выходного тока, определяемые по ОС Фурье и ОС с компенсацией динамической погрешности (рис. 4б), совпадают и изменяются так же, как текущая фаза входного тока (рис. 4б, кривая 3). В момент времени $t = 0,04$ с возникает аварийный режим, который можно квалифицировать как короткое замыкание, с появлением в токе дополнительно к основной высших гармоник и апериодической составляющей. При этом текущая фаза выходного тока, полученная по ОС с компенсацией (рис. 4б, кривая 2), меньше расходится с изменением фазы входного тока (рис. 4б, кривая 3), чем рассчитанная по ОС Фурье (рис. 4б, кривая 1).

Как видно из рис. 4с, при сложном входном сигнале динамические фазовые погрешности предложенного метода получения ОС значительно меньше аналогичных величин при использовании для этой цели ЦФ Фурье (кривые 1, 2).

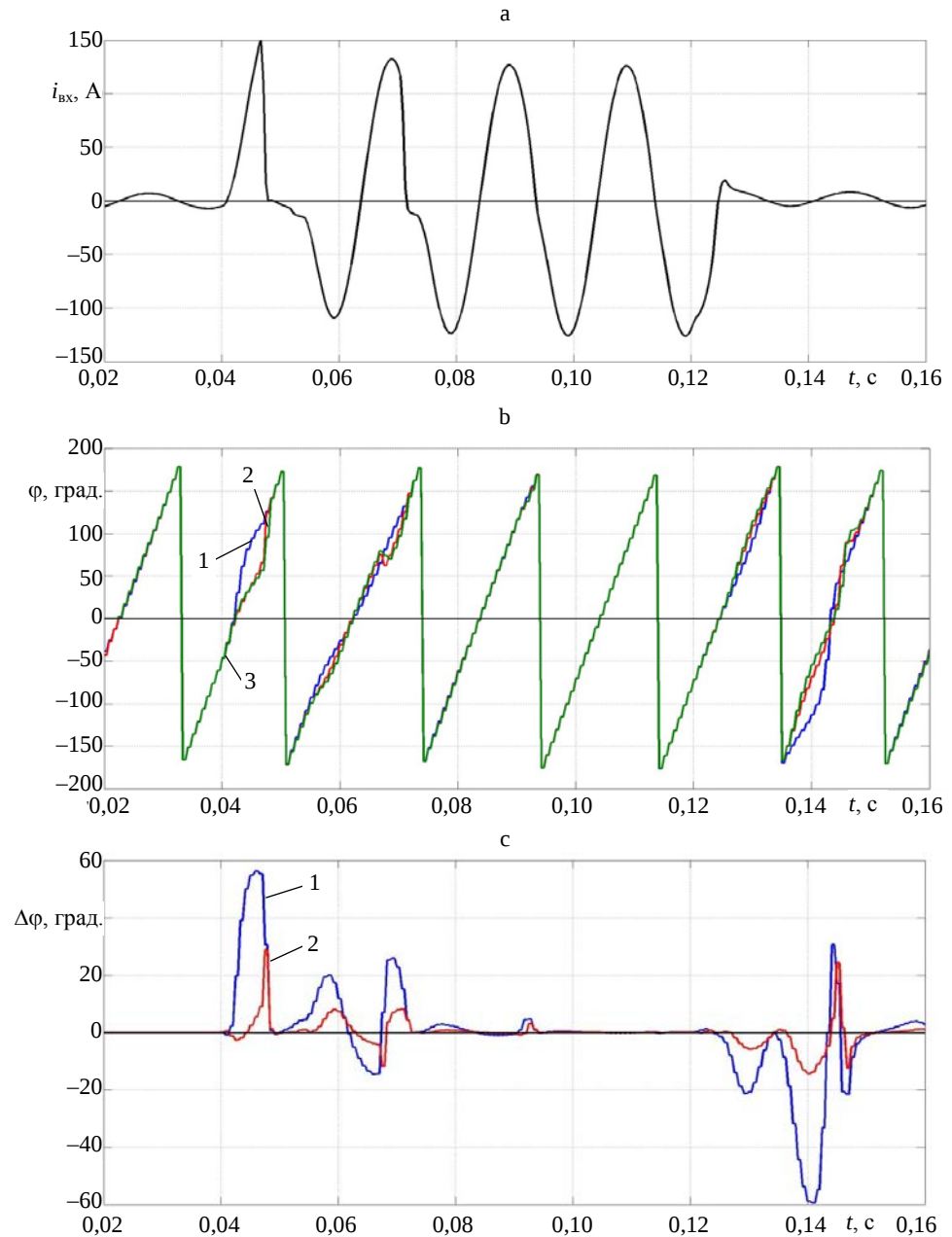


Рис. 4. Результаты компенсации динамической фазовой погрешности при сложном входном сигнале: а – входной ток; б – текущая фаза сигнала: 1, 2 – выходного при определении соответственно по ортогональной составляющей Фурье и ортогональной составляющей с компенсацией; 3 – входного; с – динамическая фазовая погрешность: 1 – цифровых фильтров Фурье; 2 – предложенного метода с компенсацией

Fig. 4. The results of compensation of dynamic phase error when a input signal is complex: а – input current; б – current phase of the signal: 1, 2 – of an output one when determined respectively by the orthogonal Fourier component and the orthogonal component with compensation; 3 – of an input one; с – dynamic phase error of: 1 – digital Fourier filters; 2 – the proposed method with compensation

В заключение необходимо отметить, что предложенный метод компенсации динамической фазовой погрешности при формировании ОС является работоспособным и достаточно эффективным как при синусоидальном, так и при сложном входном сигнале.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод компенсации обеспечивает снижение динамической фазовой погрешности классических цифровых фильтров Фурье в три-четыре раза.

2. Реализованные на основе разработанного метода формирователи ортогональных составляющих сигналов могут быть использованы как в простых, так и в сложных измерительных органах с двумя и более входными величинами микропроцессорных защит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Schweitzer III, E. O. Filtering for Protective Relays / E. O. Schweitzer III, D. Hou // WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings. IEEE, 1993. P. 15–23. <https://doi.org/10.1109/wescan.1993.270548>.
3. 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>.
4. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах с отстройкой от фазовых динамических погрешностей / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетическая стратегия. 2022. № 1. С. 32–34.
5. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
6. Дьяконов, В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2011. 975 с.
7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
8. 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>.
9. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5. The MathWorks, 2011.
10. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
11. Цифровой измерительный орган тока 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>.

REFERENCES

1. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Schweitzer III E. O., Hou D. (1993) Filtering for Protective Relays. *WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Enviroment. Conference Proceedings. IEEE*, 15–23. <https://doi.org/10.1109/wescan.1993.270548>.
3. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Improvement of Algorithm for Formation of Orthogonal Components of Input Quantities in Microprocessor Protection. *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).
4. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Bulochik E. V., Rumiantsev Yu. V. (2022) Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protection of Electric Installations that Have Detuning from Phase Dynamic Errors. *Energeticheskaya Strategiya [Energy Strategy]*, (1), 32–34 (in Russian).
5. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protections: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, BNTU. 168 (in Russian).
6. D'yakonov V. P. (2011) *MATLAB and Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMK Press Publ. 975 (in Russian).
7. Chernykh I. V. (2011) *Modeling of Electrical Devices in MATLAB, SimowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press Publ; Saint-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
8. 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 the 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).
9. *SimPowerSystems. User's Guide. Version 5*. The MathWorks, 2011.
10. Dabney J., Harman T. (2003) *Mastering Simulink 4*. Moscow, BINOM Publ. 403 (in Russian).
11. 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 the 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: 8 February 2022

Accepted: 19 April 2022

Published online: 31 May 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-209-223>

УДК 621.313.8

Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при стабильной нагрузке

К. В. Доброго¹⁾, И. А. Козначеев²⁾

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

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Вибрации и неравномерность момента на оси генератора на постоянных магнитах приводят к его усиленному износу, шумности, снижению эффективности работы. В статье теоретически рассмотрена возможность устранения осцилляций момента вращения генератора на постоянных магнитах при постоянной нагрузке за счет взаимной компенсации взаимодействия катушек с полем постоянных магнитов при определенной симметрии этого поля. Данный эффект назван пи-резонансом. Для заданного класса модельных функций плотности магнитного поля постоянных магнитов показано, что полная компенсация наступает при определенном числе катушек (N_s) и магнитов (N_r), в то время как для прочих комбинаций $\{N_s, N_r\}$ взаимодействие носит характер осцилляций. Приведены таблицы пи-резонанса для ряда модельных функций плотности поля, представимых рядами Фурье до пятой степени. Пи-резонанс прежде всего реализуется в случае небольшого различия в значениях N_r и N_s , что соответствует расположению вблизи главной диагонали таблицы пи-резонансов, а также при N_r, N_s , соответствующих простым числам. Количество конфигураций $\{N_r, N_s\}$, обеспечивающих пи-резонанс (компенсацию паразитных моментов), наибольшее для синусоидальной плотности магнитного потока и уменьшается, если функция плотности магнитного потока аппроксимируется рядом Фурье высокой степени. В случае отсутствия сердечников катушек пи-резонанс возможен при $N_s = N_r$. Показана дополнительная возможность пи-резонанса при размещении катушек с противоположных сторон от ротора. Обоснован упрощенный метод исследования системы (без интегрирования уравнения для тока индукции). Результаты могут быть использованы при конструировании генераторов и моторов на постоянных магнитах.

Ключевые слова: момент трогания, генератор, магнит, неравномерность момента, паразитные моменты, моделирование, электромотор, статор, ротор, магнитное поле

Для цитирования: Доброго, К. В. Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при стабильной нагрузке / К. В. Доброго, И. А. Козначеев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 209–223. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-209-223>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
kirilldobrego@gmail.com

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
2200713, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
kirilldobrego@gmail.com

Symmetric Resonance Mechanism for Elimination of Parasitic Torque of a Permanent Magnet Generator under Stable Load

K. V. Dobrego¹⁾, I. A. Koznacheev²⁾

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

²⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Vibration and torque ripple of the permanent magnet generator axis cause excessive wearing up of the generator, noise, efficiency reduction. The article theoretically considers the possibility of eliminating the oscillation of the rotation torque of the permanent magnets generator at constant load due to mutual compensation of the interaction of coils with the field of permanent magnets in the case of certain symmetry of this field. This effect is called pi resonance. For a given class of model functions of the magnetic field density of permanent magnets, it is shown that full compensation occurs with a certain number of coils (N_s) and magnets (N_r), while for other combinations of $\{N_s, N_r\}$ the interaction is in the nature of oscillations. Pi resonance tables are given for a number of model field density functions represented by Fourier series up to the fifth power. Pi resonance is primarily realized in the case of a small difference in the values of N_r and N_s , which corresponds to the location near the main diagonal of the pi resonance table, as well as at the values of N_r, N_s corresponding to prime numbers. The number of configurations $\{N_r, N_s\}$ providing pi resonance (compensation of parasitic torques) is the largest for the sinusoidal magnetic flux density and decreases if the magnetic flux density function is approximated by a high-degree Fourier series. It is shown that in the absence of coil cores, pi resonance is possible at $N_r = N_s$. An additional possibility of pi resonance is shown when placing coils on opposite sides of the rotor. A simplified method of investigating the system (without integrating the equation for the induction current) is substantiated. The results can be used in the design of permanent magnets generators and motors.

Keywords: starting torque, generator, magnet, torque ripple, parasitic torque, modeling, electric motor, stator, rotor, magnetic field

For citation: Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2022) Symmetric Resonance Mechanism for Elimination of Parasitic Torque of a Permanent Magnet Generator under Stable Load. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 209–223. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-209-223> (in Russian)

Введение

Осцилляции (подергивания) момента вращения при работе генератора – известные явления, обусловленные неравномерностью магнитного поля и силового взаимодействия обмоток статора и ротора (или магнитов ротора с катушками индуктивности), относимые к паразитным моментам [1]. Они приводят к увеличению шумности работы системы, ускоренному износу опорных узлов, снижению КПД. Борьбе с этим явлением посвящено значительное количество научных исследований и технических решений [2–7].

В [8] рассмотрена задача полной компенсации паразитных моментов при трогании и вращении на холостом ходу генератора на постоянных магнитах. Численным экспериментом показано, что для определенного класса потенциалов взаимодействия поля магнитов и сердечников катушек

возможно полное устранение указанных моментов. Определяющим условием при этом является строгая симметричность поля, геометрически точное расположение катушек и магнитов, а также их численное соотношение. Показано, что эффект исчезновения момента трогания и осцилляций момента при вращении на холостом ходу, названный пи-резонансом, быстро пропадает при невыполнении вышеперечисленных условий.

Не менее важной представляется задача снижения или полной компенсации паразитных моментов при работе генератора под нагрузкой, когда требуется максимальная плавность хода. Определенная стабильность скорости вращения генератора обеспечивается массовой инерцией вращающихся частей, однако механические подергивания момента силы на оси создают шумы, вибрации, влияют на износ подшипников. Вопрос о компенсации таких моментов рассмотрен в статье с помощью апробированной в [8] методики численного анализа.

Объектом исследования является синхронный генератор с торцевым расположением постоянных магнитов и пространственно разнесенными катушками индуктивности. С точки зрения физики рассматриваемая ситуация существенно отличается от случая статического взаимодействия ферромагнитных сердечников и постоянных магнитов [8]. Добавляется динамический компонент, связанный с взаимодействием поля ротора с токами индукции и самоиндукции катушек. Локальные силы и магнитные поля становятся функциями не только углового расположения ротора (координата γ), но и скорости его вращения $\omega = d\gamma/dt$.

Исходя из закона магнитомеханического преобразования энергии [9], можно утверждать, что суммарное магнитное поле системы вращается со скоростью вращения ротора ω . Каждая катушка статора находится во вращающемся магнитном поле, конфигурация и интенсивность которого предполагаются неизменными при постоянстве ω и электрической нагрузки. Периодичность общего поля определяется количеством постоянных магнитов, поскольку в системе изначально отсутствует иная симметрия магнитного поля. При этом каждая катушка испытывает периодическое силовое взаимодействие с магнитами ротора, и соответствующие периодические изменения испытывает энергия катушки (магнитного диполя) в магнитном поле.

В данной статье задача рассматривается не в общем виде, с использованием Фурье-разложения функции магнитной индукции и точных аналитических выкладок, а с помощью эвристического метода – на основе численных экспериментов с модельными системами статор – ротор делаются обобщающие выводы, имеющие практическое и теоретическое значение.

Разработана простая модель для изучения характера взаимодействия статора и ротора при постоянной нагрузке. Методом численного моделирования показано, что, как и при работе генератора без нагрузки, моменты взаимодействия поля с катушками могут быть строго компенсированы при определенных конфигурациях плотности магнитного поля магнитов и соотношениях числа магнитов (N_r) и катушек (N_s), что, аналогично

случаю [8], названо пи-резонансом. Условия такой компенсации представлены таблицами пи-резонанса. При отсутствии сердечников катушек пи-резонанс возможен при $N_s = N_r$. Дополнительная возможность компенсации осцилляций момента появляется при размещении катушек с противоположных сторон от ротора и их определенном угловом смещении относительно друг друга (скрытая симметрия). Обоснован упрощенный метод исследования системы без интегрирования уравнения для тока индукции.

Полученные результаты позволяют целенаправленно выбирать конфигурацию генераторов на постоянных магнитах, обеспечивающую минимальные паразитные моменты при его работе.

Постановка задачи

Рассмотрим синхронный генератор с торцевым расположением постоянных магнитов. На статоре смонтированы пространственно разнесенные плоские катушки без сердечников, на роторе закреплены плоские магниты с постоянной или чередующейся ориентацией полярности (рис. 1).

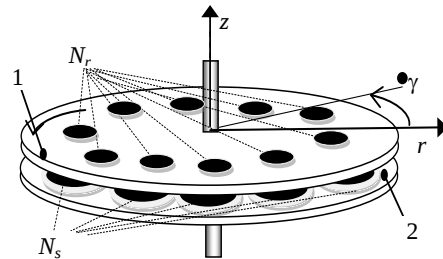


Рис. 1. Схема магнитно-механической системы статор – ротор:

1 – ротор с N_r вмонтированными постоянными магнитами; 2 – статор с N_s разнесенными катушками

Fig. 1. The diagram of the magnetic and mechanical stator – rotor system: 1 – rotor with N_r mounted permanent magnets; 2 – stator with N_s separate (spaced) coils

В рамках нашей модели система статор – ротор – магнитное поле рассматривается как двумерная: зависимость от координаты z отсутствует, все значимые поля и процессы, обеспечивающие электромеханическое преобразование энергии, сосредоточены в некоторой кольцевой полосе и не требуют разрешения по радиальной координате, поэтому все физические параметры системы считаются функциями единственной переменной – угла γ . Индукция магнитного поля B рассматривается как эквивалентная плотность потока магнитной индукции в бесконечно малом секторе под углом γ $dB(\gamma)$. Потокосцепление катушки определяется интегралом $dB(\gamma)$ по углу, соответствующему размеру катушки:

$$\Phi(\gamma, \mu) = F \int_{\alpha_i - \mu/2}^{\alpha_i + \mu/2} dB(\gamma) d\gamma, \quad (1)$$

где α_i – угол расположения i -й катушки; μ – угловой сектор, занимаемый отдельной катушкой; F – коэффициент (форм-фактор) размерности площади, определяемый геометрией катушки и магнитного поля.

Дифференциал потокосцепления определяется непосредственно функцией $dB(\gamma)$

$$\frac{d\Phi(\gamma, \mu)}{d\gamma} = F(dB(\gamma + \mu/2) - dB(\gamma - \mu/2)). \quad (2)$$

Среднее значение магнитной индукции поля, взаимодействующего с i -й катушкой:

$$\bar{B}(\gamma, \alpha_i, \mu) = \int_{\alpha_i - \mu/2}^{\alpha_i + \mu/2} dB(\gamma) d\gamma. \quad (3)$$

Если катушки расположены вплотную друг к другу, то значение μ близко к базовой величине угла $\mu_0 = 360/N_s$, в противном случае $\mu < \mu_0$.

Суть функционирования генератора – превращение механической работы в энергию электромагнитного поля и затем в работу электрического тока потребителя (рис. 2).

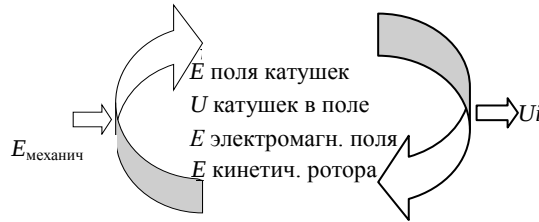


Рис. 2. Схема преобразования энергии в генераторе

Fig. 2. The diagram of energy transformation in electric generator

При постоянном потоке поступающей и выдаваемой энергии любые неравномерности момента вращения ротора (паразитные моменты) связаны с пульсацией потенциальной энергии катушек в магнитном поле системы, которая может быть выражена как сумма скалярных произведений магнитного момента каждой катушки на соответствующую среднюю для катушки индукцию магнитного поля системы [10]:

$$U(\gamma, \mu) = - \sum_{n=1}^{N_s} (m_i(\gamma, \mu) \bar{B}(\gamma)), \quad (4)$$

где $m_i = i_i NS$ – магнитный момент катушки, задаваемый протекающим током i_i , числом витков N и площадью сечения S .

Отметим, что индукция, рассматриваемая в (4), создается не только постоянными магнитами ротора, но и всеми соседними катушками статора. Однако в первом приближении (по крайней мере, при малых токах нагрузки) можно ограничиться учетом только поля постоянных магнитов.

Согласно закону магнитной индукции, ЭДС, возникающая в i -й катушке, пропорциональна скорости изменения магнитного потока (потокосцепления), а при появлении тока также возникает ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}C_i(\gamma) = -\frac{d\Phi_i}{d\gamma}\omega - L\frac{di_i}{d\gamma}\omega, \quad (5)$$

где L – индуктивность катушки, Гн; $\omega = d\gamma/dt$ – скорость вращения ротора, м/с.

Учитывая связь ЭДС, тока и сопротивления, получаем уравнение для тока в i -й катушке

$$\frac{di_i}{d\gamma} + \frac{r+R}{\omega L}i_i(\gamma) = -\frac{1}{L}\frac{d\Phi}{d\gamma}, \quad (6)$$

где R, r – сопротивление нагрузки и внутреннее сопротивление катушки, Ом.

Решив (6) для модельных функций плотности магнитной индукции dB для каждой катушки, рассчитаем магнитный момент всех катушек $m_i(\gamma, \mu) = i_i NS$ и суммарную энергию катушек в поле согласно (4) или учитывая, что $\bar{B}(\gamma) = \Phi_i/S$:

$$U(\gamma, \mu) = -N \sum_{n=1}^{N_s} (i_i(\gamma) \Phi_i(\gamma)). \quad (7)$$

Таким образом, (1)–(3), (6), (7) позволяют вычислить величину потенциальной энергии катушек в поле генератора и проанализировать равномерность работы генератора при различных конфигурациях системы магнитов и катушек.

В определенном приближении функцию $U(\gamma, \mu)$ можно записать в явном виде, без интегрирования (5). Для этого перепишем (6) в конечно-разностном виде

$$\frac{i_i(\gamma + \delta) - i_i(\gamma)}{\delta} \cong -\frac{R+r}{\omega L} \left(i_i(\gamma) + \frac{\omega}{R+r} \frac{d\Phi_i}{d\gamma} \right), \quad (8)$$

где $\delta \ll \mu$ – малый угол.

Из (8) следует, что если $\delta = \frac{\omega L}{R+r}$, то $i_i(\gamma + \delta) = -\frac{\omega}{R+r} \frac{d\Phi}{d\gamma}$. Таким об-

разом, при относительно небольшом значении параметра $\delta = \frac{\omega L}{R+r}$ ток в катушке определяется периодической функцией изменения потока со сдвигом по фазе, равным δ :

$$i_i(\gamma) \cong -\frac{\omega}{R+r} \frac{d\Phi_i(\gamma - \delta)}{d\gamma}. \quad (9)$$

Поскольку $\omega L \ll (R + r)$ (условие малости тока) легко выполняется в случае катушек без сердечников, тем более для низкооборотных генераторов, запишем выражение для энергии катушек в системе в явном виде

$$U(\gamma, \mu) = \frac{FN\omega}{R+r} \sum_{n=1}^{N_s} \left\{ \left[dB\left(\frac{360n}{N_s} + \gamma + \mu/2 - \delta\right) - dB\left(\frac{360n}{N_s} + \gamma - \mu/2 - \delta\right) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[\int dB\left(\frac{360n}{N_s} + \gamma + \mu/2\right) - \int dB\left(\frac{360n}{N_s} + \gamma - \mu/2\right) \right] \right\}. \quad (10)$$

Предположим, что определенная при помощи (10) картина пи-резонансов в системе будет сохраняться для любых токов (без наложения условия малости δ), поскольку отсутствуют физические причины нарушения симметрии магнитно-механической системы статор – ротор с возрастанием тока нагрузки. Гипотеза проверена прямым сравнением расчетов, выполненных по (10) и путем численного интегрирования (6). Установлено, что таблицы пи-резонансов, получаемые указанными способами, идентичны, во всяком случае для рассмотренных модельных функций магнитной индукции. При этом вычисления по (10) существенно проще.

Численный эксперимент

В качестве модельных функций плотности магнитного потока используем физически правдоподобные гладкие периодические симметричные (в рамках одного периода) функции:

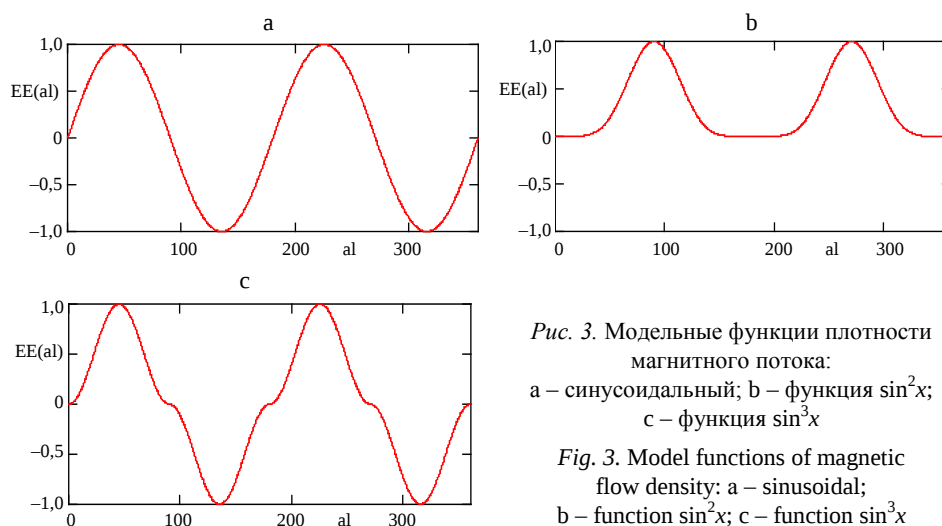
$$dB_1(\gamma) = \sin(\gamma)^n, \quad (11)$$

где n – целое положительное число.

Функции (11) могут рассматриваться как базис для аппроксимации более сложных функций потенциала. Основанием для такого утверждения является то, что функции синуса в степени n представимы в виде конечных рядов Фурье с высшим членом порядка n , и, таким образом, линейная комбинация модельных функций (11) до степени n обеспечивает аппроксимацию произвольной функции с точностью, эквивалентной Фурье-разложению этого же порядка. Первообразные (неопределенные интегралы) функций (11) выражаются в явном виде [11]:

$$\int \sin \gamma = \cos \gamma; \\ \int \sin(\gamma)^2 = \frac{\gamma}{2} - \frac{\sin 2\gamma}{4}; \\ \int \sin(\gamma)^3 = \frac{\cos^3 \gamma}{3} - \cos \gamma; \\ \int \sin(\gamma)^4 = \frac{3\gamma}{8} - \frac{\sin 2\gamma}{4} + \frac{\sin 4\gamma}{32}. \quad (12)$$

Для наглядности приведем вид функций синуса, его четных и нечетных степеней (2)–(5) (рис. 3).



Функции с нечетными степенями n характеризуются симметричными максимумами и минимумами, в то время как у функций с четными степенями n максимумы и минимумы различны (рис. 3). Ввиду этого функции с нечетными степенями адекватны системе с чередующейся ориентацией полярности магнитов, а с четными – системе с постоянной ориентацией их полюсов. Рассмотрим отдельно взаимодействия статор – ротор для ряда модельных функций (11) с нечетными и четными степенями.

Суммарная энергия катушек в поле как функция угла поворота ротора получается подстановкой соответствующих функций (11), (12) в (10) и последующим численным расчетом. Простейшее качественное исследование графика функции позволяет построить таблицы пи-резонансов для случая работы генератора при стабильной нагрузке (табл. 1–3), где N_s – число катушек с сердечниками на статоре, N_r – число магнитов на роторе (для систем с постоянной полярностью магнитов) или периодов функции плотности магнитного поля (для систем с чередующейся полярностью магнитов), цифрами обозначено число осцилляций функции $U(\gamma)$ за один оборот ротора, пустые ячейки показывают отсутствие осцилляций. С практической точки зрения пи-резонанс обеспечивает плавный ход ротора.

В табл. 1 представлены пи-резонансы в системе статор – ротор с базовой модельной функцией плотности магнитного поля $dB_1(\gamma) = \sin \gamma$.

Интересно, что для модельной функции $dB_1(\gamma) = \sin^2 \gamma$ таблица пи-резонансов качественно не отличается от случая $dB_1(\gamma) = \sin \gamma$.

Расчет соответствующих взаимодействий для модельных функций (11) с различными n показывает общую закономерность: с повышением степени n множество комбинаций $\{N_s, N_r\}$, обеспечивающих пи-резонанс, уменьшается, осциллирующее силовое взаимодействие становится более

универсальным свойством системы. При этом амплитуда энергии взаимодействия, как правило, уменьшается для вновь появляющихся комбинаций $\{N_s, N_r\}$, а также с повышением количества периодов (частоты) осцилляций взаимодействия.

Таблица 1

**Пи-резонансы в системе статор – ротор нагруженного генератора
для функции плотности магнитной индукции $dB_1(\gamma) = \sin\gamma$**

**Pi resonances in the stator – rotor system of a loaded generator
for the magnetic induction density function $dB_1(\gamma) = \sin\gamma$**

N_s	N_r															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
2	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
3			6			12			18			24			30	
4		4		8		12		16		20		24		28		32
5					10	0				20					30	
6			6			12			18			24			30	
7							14							28		
8				8				16				24				32
9									18							
10					10					20					30	
11											22					
12						12						24				
13													26			
14							14							28		
15															30	
16								16								32

Приведем сводные таблицы, в которых обобщены качественные результаты расчетов для ряда функций $\sin\gamma$, $\sin^3\gamma$, $\sin^5\gamma$, соответствующего случаю чередующихся полюсов магнитов (табл. 2), и ряда функций $\sin^2\gamma$, $\sin^4\gamma$, $\sin^6\gamma$, соответствующего случаю постоянной ориентации полюсов магнитов (табл. 3).

В табл. 2 без затемнения оставлены ячейки, соответствующие пи-резонансам для трех модельных функций с $n = 1, 3, 5$. Темно-серым цветом выделены ячейки, исключенные из пи-резонанса для модельной функции синуса ($n = 1$), серым – дополнительно исключаемые из пи-резонанса при модельной функции с $n = 3$, светло-серым – дополнительно исключаемые из пи-резонанса при модельной функции с $n = 5$. Цифры в ячейках показывают число периодов в зависимости $U(\gamma)$, приходящихся на один полный оборот ротора, для случая с $n = 5$. Характеризуя таблицу качественно, можно сказать, что более светлые ячейки соответствуют более благоприятным параметрам системы с точки зрения плавности хода ротора (уменьшения подергиваний).

Таблица 2

Пи-резонансы в системе статор – ротор нагруженного генератора
для функции плотности магнитной индукции $dB_1(\gamma) = \sin^n \gamma$ при $n = 1, 3, 5$

Pi resonances in the stator – rotor system of a loaded generator
for the magnetic induction density function $dB_1(\gamma) = \sin^n \gamma$ at $n = 1, 3, 5$

N_s	N_r																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
2	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
3	6	12	6	24	30	12	42	48	18	60	66	24	78	84	30	96	102	36	114	120
4	4	4	12	8	20	12	28	16	36	20	44	24	52	28	60	32	68	36	76	40
5	10	20	30	40	10	60	70	80	90	20	110	120	130	140	30	160	170	180	190	40
6	6	12	6	24	30	12	42	48	18	60	66	24	78	84	30	96	102	36	114	120
7							14							28						
8	8	8	24	8	40	24	56	16	72	40	88	24	104	56	120	32	136	72	152	40
9			18			36			18			72			90			36		
10	10	20	30	40	10	60	70	80	90	20	110	120	130	140	30	160	170	180	190	40
11											22									
12		12	12	24		12		48	36	60		24		84	60	96		36		120
13													26							
14							14							28						
15			30		30	60			90	60		120			30			180		120
16		16		16		48		16		80		48		112		32		144		80
17																	34			
18			18			36			18			72			90			36		
19																			38	
20		20		40	20	60		80		20		120		280	60	160		180		40

Аналогично в табл. 3 темно-серым цветом выделены ячейки, исключенные из пи-резонанса уже при базовой модельной функции синуса (качественно случаи $\sin \gamma$ и $\sin^2 \gamma$ не отличаются), серым – дополнительно исключаемые из пи-резонанса при модельной функции с $n = 4$, светло-серым – дополнительно исключаемые из пи-резонанса при модельной функции с $n = 6$. Цифры в ячейках показывают число периодов функции $U(\gamma)$, приходящихся на один полный оборот ротора, для случая с $n = 6$. Как и для табл. 2, более светлые ячейки соответствуют более благоприятным параметрам с точки зрения плавности хода ротора для системы с постоянной ориентацией магнитов.

В целом ряд модельных функций четных степеней обеспечивает несколько более благоприятные условия для пи-резонанса, поскольку в табл. 3 больше ячеек, соответствующих пи-резонансу в системе, по сравнению с табл. 2.

Численным экспериментом установлено, что для рядов модельных функций как с четным, так и нечетным n при постоянных значениях N_s , N_r число осцилляций (периодов) в $U(\gamma)$, приходящихся на полный оборот ротора, не меняется при увеличении или уменьшении n на четное число, если только при меньшем из значений n не обеспечивается пи-резонанс. Поэтому указанные в табл. 2, 3 значения числа периодов распространяются на все n одной четности.

Таблица 3

Пи-резонансы в системе статор – ротор нагруженного генератора
для функции плотности магнитной индукции $dB_1(\gamma) = \sin^n \gamma$ при $n = 2, 4, 6$

Pi resonances in the stator – rotor system of a loaded generator
for the magnetic induction density function $dB_1(\gamma) = \sin^n \gamma$ at $n = 2, 4, 6$

N_s	N_r																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	2	2	6	4	10	6	14	8	18	10	22	12	26	14	30	16	34	18	38	20
3	3	6	3	12	15	6	21	24	9	30	33	12	39	42	15	48	51	18	57	60
4	4	4	12	4	20	12	28	8	36	20	44	12	52	28	60	16	68	36	76	20
5	5	10	15	20	5	30	35	40	45	10	55	60	65	70	15	80	85	90	95	20
6	6	6	6	12	30	6	42	24	18	30	66	12	78	42	30	48	102	18	114	60
7							7							14						
8		8		8		24		8		40		24		56		16		72		40
9			9			18			9			36			45			18		
10		10		20	10	30		40		10		60		70	30	80		90		20
11											11									
12		12	12	12		12		24	36	60		12		168	60	48		36		60
13													13							
14							14							14						
15			15		15	30			45	30		60			15			90		60
16				16				16				48				16				80
17																	17			
18			18			18			18			36			90			18		
19																			19	
20				20	20			40		20		60			60	80				20

Общей особенностью, как и в случае работы без нагрузки [8], является то, что ячейки, обозначающие пи-резонанс, остаются локализованными около диагональных элементов таблицы. Кроме того, пи-резонанс преимущественно наблюдается при N_r, N_s , соответствующих простым числам.

Компенсация паразитных моментов при условии $N_r = N_s$

При равенстве числа магнитов и катушек статора (табл. 1–3, диагональные ячейки) в общем случае возникает осцилляция момента вращения вала генератора. Однако при отсутствии магнитных сердечников катушек данное свойство не является универсальным. Неравномерное зацепление статора и ротора может быть компенсировано за счет выбора размера катушек и их перекрытия (эффективного сектора, занимаемого катушкой). Действительно, в рассматриваемой постановке задачи взаимодействие катушки и поля ротора определяется интегралом (10), который берется по углу μ , занимаемому катушкой. Ввиду существенной площади сечения проводников катушек эффективная площадь сечения катушки меньше внешней (габаритной) ее площади, и при раздельном расположении последних сектор магнитного поля, взаимодействующего с катушкой, меньше базового сектора $\mu_0 = 360/N_s$. Именно такое условие принималось при расчете табл. 1–3. Однако при увеличении размера катушек и определенном наложении их друг на друга угол μ может стать равным или превзойти μ_0 . Численный расчет показывает, что когда $\mu = \mu_0$, пи-резонанс имеет место и в слу-

чае $N_r = N_s$. При этом остальная часть таблицы пи-резонансов не претерпевает изменения. На рис. 4 представлена амплитуда осциллирующей функции $U(\gamma)$ в зависимости от безразмерного эффективного сектора, занимаемого катушкой, для различных значений N_r . Значение комплекса $FN\omega/(R+r)$ при расчете (10) принималось равным 1.

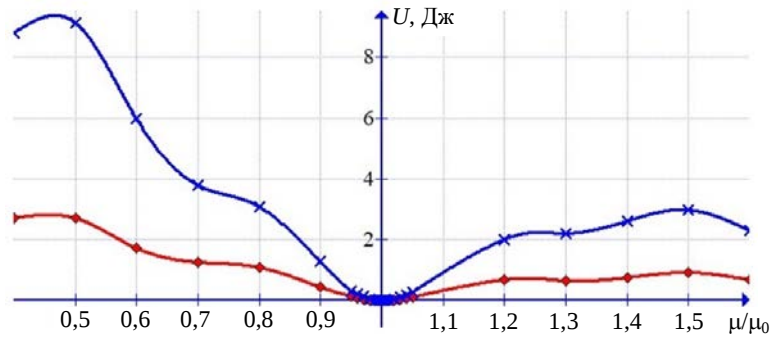


Рис. 4. Амплитуда функции $U(\gamma)$ в зависимости от относительного угла сектора, занимаемого катушкой μ/μ_0 : 1 – $N_r = N_s = 5$; 2 – 9

Fig. 4. Amplitude of $U(\gamma)$ as a function of the relative angle of the sector occupied by the coil μ/μ_0 : 1 – $N_r = N_s = 5$; 2 – 9

Из графика (рис. 4) видно, что амплитуда $U(\gamma)$ является существенно нелинейной функцией. Интенсивность осцилляций момента обращается в нуль при $\mu/\mu_0 = 1$, растет при отклонении от этого значения (как в меньшую, так и в большую сторону) и достигает максимума при $\mu/\mu_0 \sim 0,5$.

Случай двух статоров. Скрытая симметрия системы

При использовании двух статоров, расположенных с двух сторон от ротора, характер взаимодействия с каждым из них по отдельности остается прежним. В силу аддитивности и независимости взаимодействия, если пи-резонанс реализуется для одного статора, он сохранится и для двух одинаковых статоров, несмотря на их взаимное угловое расположение.

Если при этом два статора располагаются с угловым сдвигом $360/(2N_s)$, соответствующим углу симметрии системы катушек, они образуют периодическую структуру и взаимодействуют как единая система с удвоенным количеством катушек. Например, для синусоидальной плотности магнитной индукции при $N_r = 9$, $N_{s1} = 6$, $N_{s2} = 6$ (индексы 1, 2 обозначают первый и второй статоры) система закономерно дает осциллирующий потенциал $U(\gamma)$ с 18 периодами, как и при взаимодействии с каждым по отдельности. Однако если сдвиг угла расположения обоих статоров $360/(2N_s) = 30^\circ$, произойдет полная компенсация паразитных моментов в соответствии с табл. 1. Характер приближения к пи-резонансу показан на рис. 5, где штриховой вертикальной линией обозначен угол сдвига, соответствующий симметричному равноудаленному расположению статоров. Из приведенного графика видно, что имеет место линейное приближение к состоянию пи-резонанса.

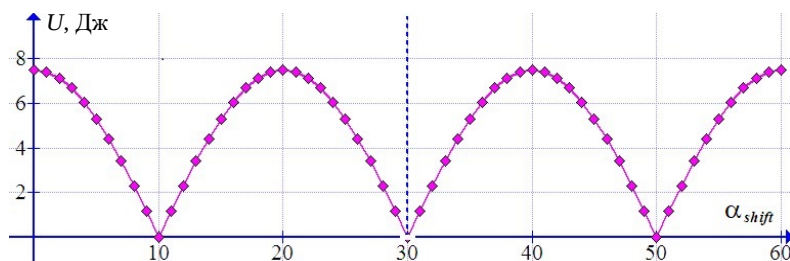


Рис. 5. Энергия взаимодействия ротор – статор в зависимости от угла сдвига первого и второго статоров α_{shift} : $N_r = 9$, $N_{s1} = 6$, $N_{s2} = 6$

Fig. 5. Stator – rotor interaction energy as a function of angular shift between the first and the second stators α_{shift} : $N_r = 9$, $N_{s1} = 6$, $N_{s2} = 6$

В рассматриваемой системе, как и в случае задачи о нулевом моменте трогания [8], обнаруживается скрытая симметрия: пи-резонанс реализуется не только при симметричном равноудаленном расположении статоров ($\alpha_{shift} = 30^\circ$), но и при дальнейшем смещении одного из них на целое число базовых углов симметрии магнитной системы $\theta_0 = 360/(2N_r)$ (в данном случае 20°) (рис. 5). Разумеется, такой эффект может возникнуть только при высокой геометрической точности размещения катушек и симметричном расположении статоров по обе стороны от ротора, что требует специального подхода при конструировании и изготовлении генератора. Закономерности, связанные с точностью положения магнитов и катушек, обсуждены в [8].

Другой тип скрытой симметрии системы обнаруживается, когда $N_{s1} = N_{s2}$ и $N_r = N_{s1} + N_{s2}$. В этом случае при симметричном равноудаленном выстраивании катушек пи-резонанс не возникает (табл. 2, 3). Однако он может появиться при сдвиге одного ротора от симметричного расположения на половину базового угла симметрии магнитной системы $\theta_0/2 = 360/(4N_r)$ (в данном случае 9°) (рис. 6).

В случае $N_{s1} \neq N_{s2}$ пи-резонанс в системе не выявлен. Более полное рассмотрение вопроса о скрытой симметрии в системе требует отдельного исследования.

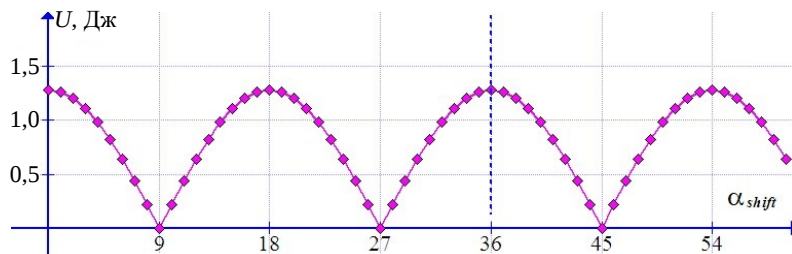


Рис. 6. Энергия взаимодействия ротор – статор в зависимости от угла сдвига первого и второго статоров α_{shift} : $N_r = 10$, $N_{s1} = 5$, $N_{s2} = 5$

Fig. 6. Stator – rotor interaction energy as a function of angular shift between the first and the second stators α_{shift} : $N_r = 10$, $N_{s1} = 5$, $N_{s2} = 5$

ВЫВОДЫ

1. Методом численного эксперимента исследована работа генератора на постоянных магнитах при стабильной нагрузке. Рассмотрен вопрос о симметрично-резонансном механизме компенсации осцилляций момента вращения генератора при определенной симметрии поля постоянных магнитов. Эффект полной компенсации осцилляций назван пи-резонансом. Показано, что компенсация паразитных моментов в генераторе на постоянных магнитах при работе с постоянной нагрузкой реализуется аналогично случаю трогания генератора и работы без нагрузки. Конфигурации числа магнитов и катушек $\{N_r, N_s\}$, обеспечивающих пи-резонанс, локализуются вблизи главной диагонали таблицы пи-резонансов и при значениях N_r, N_s , соответствующих простым числам.

2. Общей тенденцией является то, что число конфигураций $\{N_r, N_s\}$, обеспечивающих пи-резонанс, уменьшается с увеличением степени синуса для семейства модельных функций плотности магнитной индукции (11). Поскольку модельные функции $\sin(\gamma)^n$ разлагаются в ряд Фурье степени n , этот же вывод относится и к другим функциям, аппроксимируемым рядами Фурье той же степени.

3. Показано, что за счет выбора размера катушек и степени перекрытия площади потокоцепления возможна компенсация осцилляций при равенстве числа периодов постоянного магнитного поля и катушек ($N_r = N_s$). Однако при наличии сердечников катушек такая компенсация невозможна.

4. Рассмотрена работа генератора при наличии двух статоров, расположенных с двух сторон от ротора. Паразитные моменты в такой системе могут компенсироваться аналогично случаю одного статора при условии симметричного равноудаленного расположения статоров. При этом в системе с двумя статорами обнаружена дополнительная (скрытая) симметрия, в силу которой пи-резонанс может реализоваться не только при симметричном взаимном их расположении, но и при сдвигах, определяемых симметрией поля постоянных магнитов и катушек статора.

5. Исследование позволяет дать рекомендации по симметричной конфигурации и количеству магнитов и катушек в системе статор – ротор генератора на постоянных магнитах. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании электромоторов на постоянных магнитах, для которых задача компенсации паразитных моментов также важна [12]. Продолжением настоящего исследования может стать решение задачи о компенсации паразитных моментов в случае конкретных схем коммутации катушек и нагрузки электрической машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко, М. П. Электрические машины: в 2 ч. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. М.: Энергия. 1973. Ч. 2. 648 с.
2. Ghasemi, A. Cogging Torque Reduction and Optimization in Surface-Mounted Permanent Magnet Motor Using Magnet Segmentation Method / A. Ghasemi // Electric Power Components and Systems. 2014. Vol. 42, Iss. 12. P. 1239–1248. <https://doi.org/10.1080/15325008.2014.893548>.
3. Keyhani, A. Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines / A. Keyhani [et al.] // Electric Machines & Power Systems. 1999. Vol. 27, Iss. 7. P. 665–678. <https://doi.org/10.1080/073135699268939>.

4. Platt, D. Torque Calculation of Machines with Permanent Magnet Materials / D. Platt, S. Geetha // *Electric Machines & Power Systems*. 1996. Vol. 24, Iss. 4. P. 393–415. <https://doi.org/10.1080/07313569608955682>.
5. Macek-Kamińska, Kr. The Use of Modern Tools in Simulation of Electromechanical Systems / Kr. Macek-Kamińska, M. Kamiński // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2009. Vol. 3. P. 92–95.
6. Магнитоэлектрический генератор: пат. WO2014074009A1 / С. М. Есаков, М. С. Есаков, А. Ю. Велико-Иваненко. Опубл. 15.05.2014.
7. Motor/Generator to Reduce Cogging Torque: Patent US7595575B2 / Yu. Kaneko, H. Nakayama. Publ. date 29.09.2009.
8. Доброго, К. В. Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при трогании и на холостом ходу / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 22–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-22-36>.
9. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
10. Сивухин, Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. Т. 3. Электричество. М.: Наука, 1977. 704 с.
11. Двайт, Г. Б. Таблицы интегралов / Г. Б. Двайт. М.: Наука, 1966. 228 с.
12. Фираго, Б. И. Исследование переходных процессов электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами при линейном изменении частоты питающего напряжения / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 3. С. 197–211. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-197-211>.

Поступила 01.10.2021 Подписана в печать 07.12.2021 Опубликовано онлайн 31.05.2022

REFERENCES

1. Kostenko M. P., Piotrovskii L. M. (1973) *Electrical Machinery. Part 2*. Moscow, Energiya Publ. 648 (in Russian).
2. Ghasemi A. (2014) Cogging Torque Reduction and Optimization in Surface-Mounted Permanent Magnet Motor Using Magnet Segmentation Method. *Electric Power Components and Systems*, 42 (12), 1239–1248. <https://doi.org/10.1080/15325008.2014.893548>.
3. Keyhani A., Studer C. B., Sebastian T., Murthy S. K. (1999) Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines. *Electric Machines & Power Systems*, 27 (7), 665–678. <https://doi.org/10.1080/073135699268939>.
4. Platt D., Geetha S. (1996) Torque Calculation of Machines with Permanent Magnet Materials. *Electric Machines & Power Systems*, 24 (4), 393–415. <https://doi.org/10.1080/07313569608955682>.
5. Macek-Kamińska K., Kamiński M. (2009) The Use of Modern Tools in Simulation of Electromechanical Systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, (3), 92–95.
6. Esakov S. M., Esakov M. S., Veliko-Ivanenko A. Y. (2014) *Magneto-Electrical Generator*: Patent WO2014074009A1 (in Russian).
7. Kaneko Yu., Nakayama H. (2005) *Motor/Generator to Reduce Cogging Torque*: Patent US7595575B2.
8. Dobrego K. V. (2022) Symmetrical Resonance Mechanism of Elimination of Parasitic Torques of the Permanent Magnets Generator when Starting and Idling. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (1), 22–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-22-36> (in Russian).
9. Kopylov I. P. (1986) *Electrical Machinery*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 360 (in Russian).
10. Sivukhin D. V. (1977) *General Physics Course. Vol. 3. Electricity*. Moscow, Nauka Publ. 704 (in Russian).
11. Dwight G.B. (1966) *Tables of Integrals and Other Mathematical Data*. Moscow, Nauka Publ., 228 (in Russian).
12. Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2020) Investigation of Transients of the Electrical Drive with a Permanent Magnet Synchronous Motor under a Ramp of Supply Voltage Frequency. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 197–211. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-197-211> (in Russian).

Received: 1 October 2021 Accepted: 7 December 2021 Published online: 31 May 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-224-239>

УДК 621.313

Разработка аналитической модели для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой

А. Б. Менжинский¹⁾, С. В. Пантелеев¹⁾, А. Н. Малашин¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье представлена двумерная конечно-элементная модель магнитного поля магнитной системы синхронной электрической машины с дробными зубцовыми обмотками. Выявлены особенности распределения магнитных потоков (основного, краевого эффекта, рассеяния) в магнитной системе и построены эквивалентные схемы магнитной цепи исследуемой электрической машины при различных положениях зубца статора относительно полюсов ротора. Обоснована необходимость учета краевого эффекта и зависимости величины потока рассеяния через зубцы статора от координаты положения ротора, что нашло отражение в разработанной аналитической модели для определения потока рассеяния через зубцы статора синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой. Проведена проверка адекватности аналитических выражений посредством численного метода (метода конечных элементов). Полученная погрешность расчетов обусловлена принятыми допущениями при построении эквивалентной схемы магнитной цепи исследуемой электрической машины. Незначительное расхождение результатов аналитического расчета и численного эксперимента показывает, что предложенная модель дает возможность решить задачу количественного определения величины магнитного потока рассеяния через зубцы статора с высокой точностью. Кроме того, она позволяет установить влияние геометрических параметров магнитной цепи на характер изменения периодической функции потока рассеяния через зубец статора при наименьших временных затратах, что имеет очевидную практическую значимость. Представленная аналитическая модель может применяться в процессе оптимизации синхронной электрической машины с дробными зубцовыми обмотками.

Ключевые слова: синхронная электрическая машина, магнитный поток рассеяния, теория магнитных цепей, метод конечных элементов

Для цитирования: Менжинский, А. Б. Разработка аналитической модели для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой / А. Б. Менжинский, С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 224–239. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-224-239>

Адрес для переписки

Пантелеев Станислав Владимирович
Военная академия Республики Беларусь
просп. Независимости, 220,
220057, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 287-42-96
Panteleev-s-v@mail.ru

Address for correspondence

Panteleev Stanislav V.
Military Academy of the Republic of Belarus
220, Nezavisimosty Ave.,
220057, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 287-42-96
Panteleev-s-v@mail.ru

Development of an Analytical Model for Determining the Magnetic Flux of Scattering through the Gears of the Stator of a Synchronous Electric Machine with a Fractional Gear Winding

A. B. Menzhinski¹⁾, S. V. Pantelev¹⁾, A. N. Malashin¹⁾

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

Abstract. The article presents a two-dimensional finite element model of the magnetic field of a magnetic system of a synchronous electric machine with fractional gear windings. The specific features of the distribution of magnetic fluxes (main effect, edge effect, scattering) in the magnetic system have been revealed and equivalent circuits of the magnetic circuit of the electric machine under study have been constructed at different positions of the stator gear relative to the rotor poles. The necessity of taking into account the edge effect and the dependence of the scattering flux through the gears of the stator on the coordinate of the rotor position has been justified, which is reflected in the analytical model that has been developed for determining the scattering flux through the gears of the stator of a synchronous electric machine with a fractional gear winding. The adequacy of analytical expressions was verified by means of a numerical method (finite element method). The resulting calculation error is due to the assumptions made when constructing an equivalent circuit of the magnetic circuit of the electric machine under study. A slight discrepancy between the results of the analytical calculation and the numerical experiment shows that the proposed model makes it possible to solve the problem of quantifying the magnitude of the magnetic flux scattering through the gears of the stator with high accuracy. In addition, this ensures an accurate determination of the influence of the geometric parameters of the magnetic circuit on the nature of the change in the periodic function of the scattering flow through the stator gear in the shortest time, which is of an obvious practical significance. The presented analytical model can be used in the process of optimizing a synchronous electric machine with fractional gear windings.

Keywords: synchronous electric machine, magnetic scattering flux, theory of magnetic circuits, finite element method

For citation: Menzhinski A. B., Pantelev S. V., Malashin A. N. (2022) Development of an Analytical Model for Determining the Magnetic Flux of Scattering through the Gears of the Stator of a Synchronous Electric Machine with a Fractional Gear Winding. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 224–239. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-224-239> (in Russian)

Введение

В системах электроснабжения автономных объектов широко применяются синхронные электрические машины с постоянными магнитами (ПМ), что объясняется их надежностью, простотой конструкции, высокими коэффициентами полезного действия и мощности по сравнению с другими классами электрических машин [1, 2]. В этом классе выделяют группу синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками (СЭМ с ДЗО), которые имеют сниженную удельную массу за счет уменьшения длины лобовых частей обмотки, осевых размеров электрической машины, ширины ярма магнитопровода статора и ярма ротора [3].

Однако двусторонняя зубчатость (наличие открытых и полузакрытых пазов) магнитной системы СЭМ с ДЗО и многополюсная структура ротора обуславливают повышенный магнитный поток рассеяния через зубцы статора, который может составлять 50 % и более от общего потока рассеяния. Это вызывает дополнительные потери, непосредственно влияющие на величину основного магнитного потока через рабочую обмотку и соответственно на ЭДС исследуемой электрической машины [4]. Поэтому учет величины магнитного потока рассеяния через зубцы статора весьма важен при математическом моделировании и электромагнитном расчете СЭМ с ДЗО [5–7]. Кроме того, наличие адекватной информации о величине общего магнитного потока рассеяния необходимо для решения задач синтеза систем управления СЭМ с ДЗО [8].

Существующие научные труды в области изучения и оценки потерь СЭМ с ДЗО в основном сосредоточены на исследовании потоков рассеяния как функции от величины воздушного зазора [9] и геометрических параметров электромагнитной системы СЭМ с ДЗО [9–11] или зависимости потоков рассеяния от конструкции ротора [12]. Однако при аналитическом моделировании потока рассеяния через зубцы статора не учитываются краевой эффект и зависимость величины такого потока от координаты положения ротора.

Таким образом, необходимо разработать аналитическую модель для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора СЭМ с ДЗО, учитывающую краевой эффект и зависимость величины потока рассеяния через зубцы статора от координаты положения ротора.

Разработка аналитической модели

Особенностью СЭМ с ДЗО является то, что одному полюсному делению ротора соответствует не целое, а дробное число зубцовых (пазовых) делений статора. При этом в таких электрических машинах схема обмотки над полюсом или парой полюсов не может быть дублирована для построения всей обмотки. Правила определения схемы и параметров обмотки, а также числа ПМ для СЭМ с ДЗО приведены в [3].

На рис. 1 показан внешний вид СЭМ с ДЗО со следующими параметрами: число пар полюсов ротора $p = 7$, число зубцов магнитопровода (МПр) статора $z_1 = 12$, число зубцов на полюс и фазу $q = 2/7$. Схемы линейной развертки электромагнитной системы и трехфазной обмотки исследуемой СЭМ с ДЗО представлены на рис. 2 (A, B, C – начало фазных обмоток; X, Y, Z – концы фазных обмоток).

Для аналитического представления потоков рассеяния СЭМ с ДЗО применяется эквивалентная схема замещения магнитной цепи электрической машины, построенная с учетом наиболее вероятных путей распространения магнитных потоков в магнитной системе [13–15].

Рис. 1. Внешний вид синхронной электрической машины с дробными зубцовыми обмотками

Fig. 1. Exterior appearance of the synchronous electric machine with fractional gear winding

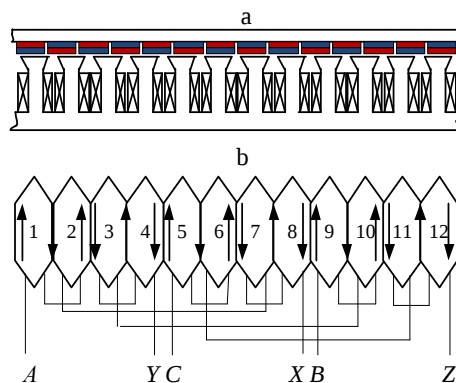


Рис. 2. Схемы линейной развертки электромагнитной системы (a) и обмотки (b) синхронной электрической машины с дробными зубцовыми обмотками

Fig. 2. Diagrams of the linear sweep of the electromagnetic system (a) and the winding (b) of the synchronous electric machine with fractional gear winding

Моделирование магнитного поля СЭМ с ДЗО. Для выявления основных магнитных потоков в магнитной системе и построения эквивалентной схемы магнитной цепи электрической машины необходимо создать и исследовать двумерную конечно-элементную модель (ДКЭМ) магнитного поля (МП) магнитной системы СЭМ с ДЗО.

Основные этапы создания ДКЭМ МП [16–19]: ввод геометрических объектов; задание свойств сред, источников поля (задание тока в обмотках, для ПМ – коэрцитивной силы) и граничных условий (на внутренних и внешних границах областей задаются граничные условия Неймана и Дирихле); построение сетки конечных элементов во всех блоках, входящих в расчетную область.

На рис. 3 представлены ДКЭМ МП тех областей магнитной системы СЭМ с ДЗО (области 1–4), которые имеют магнитные потоки различного характера и потому особенно интересны в исследовании картины распределения МП. Обозначенные области магнитной системы определяют четыре типовых случая относительного положения зубца статора и полюса ротора:

- строго рассогласованное состояние (область 1);
- частично рассогласованное состояние (область 2);
- частично согласованное состояние (область 3);
- строго согласованное состояние (область 4).

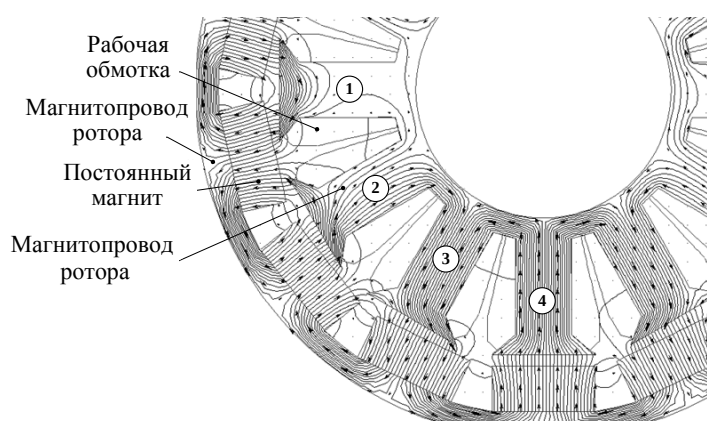


Рис. 3. Двумерная конечно-элементная модель магнитного поля магнитной системы обмотки синхронной электрической машины с дробными зубцовыми обмотками

Fig. 3. Two-dimensional finite element model of the magnetic field of the magnetic system of the synchronous electric machine with fractional gear winding

Как показал анализ ДКЭМ МП, в магнитной системе СЭМ с ДЗО существуют различные магнитные потоки:

- основной магнитный поток $\Phi_{\delta o}$, содержащий магнитный поток, сосредоточенный в воздушном зазоре между полюсами Φ_{δ} , и краевой поток (поток краевого эффекта) Φ_e . Сцепляется с витками рабочей обмотки (формирует потокосцепление) и имеет важное значение в процессе преобразования энергии;
- поток краевого эффекта Φ_e , проходящий через воздушные промежутки по краям полюсов (зубцов МПР) и замыкающийся по МПР. Также сцепляется с витками рабочей обмотки (формирует потокосцепление);
- поток рассеяния Φ_{σ} , который не сцепляется с витками рабочей обмотки генератора. Для СЭМ с ДЗО существует несколько потоков рассеяния: через зубец Φ_{σ}^z , пазового рассеяния Φ_{σ}^{sl} , через воздушный зазор Φ_{σ}^{δ} , на конце ПМ Φ_{σ}^{PM} . Из них только поток рассеяния через зубец Φ_{σ}^z зависит от координаты положения ротора. Функция его изменения носит периодический характер. При этом число периодов изменения такой функции вдоль воздушного зазора исследуемой электрической машины определяется как наибольший общий делитель числа зубцов статора и числа полюсов ротора $(z_1, 2p)$.

Эквивалентная схема магнитной цепи СЭМ с ДЗО. При построении эквивалентной схемы магнитной цепи СЭМ с ДЗО принят ряд традиционных допущений [1, 6, 7, 13]: потери в МПР от вихревых токов и магнитное сопротивление МПР не учитываются; ПМ стабилизирован, положение рабочей точки ПМ A_o (рис. 4) в процессе работы не меняется; МПР не насыщен.

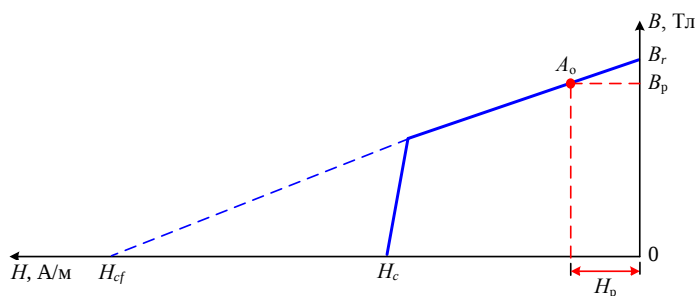


Рис. 4. Кривая размагничивания постоянного магнита

Fig. 4. Demagnetization curve of permanent magnet

На рис. 4: B_r – остаточная индукция ПМ; A_0 – рабочая точка ПМ; B_p – магнитная индукция рабочей точки ПМ; H_p – напряженность МП рабочей точки ПМ; H_c – коэрцитивная сила по индукции; H_{cf} – фиктивная коэрцитивная сила.

С учетом выявленных основных магнитных потоков (рис. 3), а также принятых допущений магнитной системе СЭМ с ДЗО (рис. 2) может быть поставлена в соответствие эквивалентная схема магнитной цепи (рис. 5).

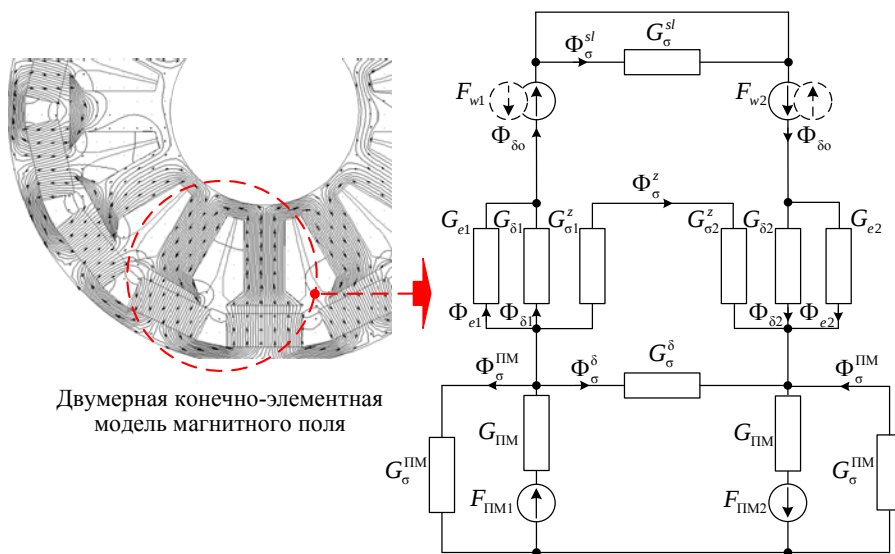


Рис. 5. Эквивалентная схема магнитной цепи синхронной электрической машины с дробными зубцовыми обмотками

Fig. 5. Equivalent circuit of the magnetic circuit of the synchronous electric machine with fractional gear winding

На рис. 5: $G_{e1(2)}$ – магнитная проводимость воздушных промежутков по путям потоков краевого эффекта; $G_{\delta1(2)}$ – то же воздушных зазоров;

В СЭМ с ДЗО поток рассеяния через зубец изменяется в зависимости от относительного положения зубца статора и полюсов ротора. Соответственно проводимость G_{σ}^z является зависимой от координаты положения ротора переменной. Характерные для СЭМ с ДЗО двусторонняя зубчатость конструкции и многополюсная структура ротора обуславливают сложный характер изменения МП в воздушном зазоре исследуемой электрической машины. Поэтому для повышения точности расчета магнитного потока через рабочую обмотку СЭМ с ДЗО необходимо определить поток рассеяния через зубец статора как функцию от координаты положения ротора с учетом краевого эффекта в воздушном зазоре.

На рис. 6–9 выделены элементарные магнитные проводимости рассеяния $dG'_{\text{м}1(2)}$, $dG''_{\text{м}1(2)}$, $dG'_{\text{air}1(2)}$, $dG''_{\text{air}1(2)}$ по путям магнитных потоков Φ_{σ}^z , $\Phi_{\sigma}^{'z1(2)}$, $\Phi_{\sigma}^{''z1(2)}$ и представлены соответствующие им эквивалентные схемы магнитных цепей для областей 1–4 магнитной системы (рис. 3).

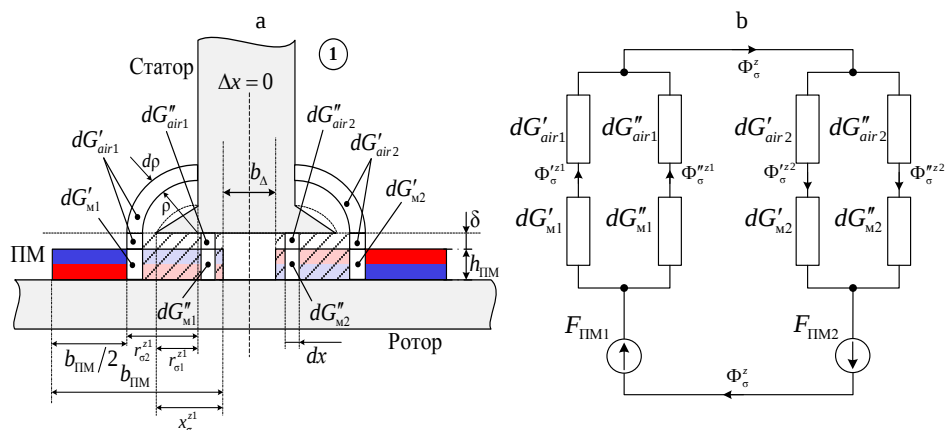


Fig. 6. Elementary scattering conductivities (a) and the equivalent circuit of the magnetic circuit (b) for area 1

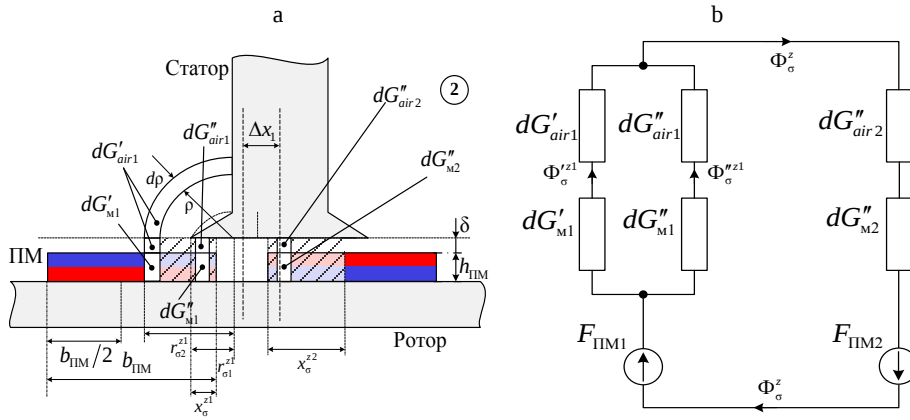


Рис. 7. Элементарные проводимости рассеяния (а) и эквивалентная схема магнитной цепи (б) для области 2

Fig. 7. Elementary scattering conductivities (a) and the equivalent circuit of the magnetic circuit (b) for area 2

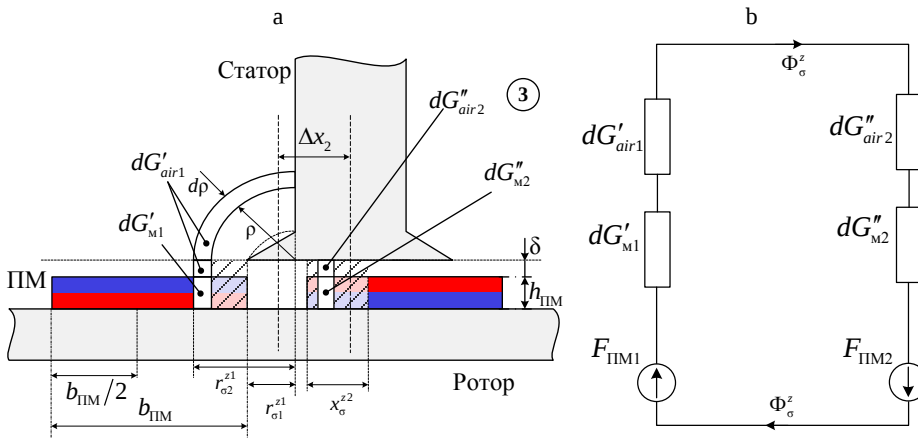


Рис. 8. Элементарные проводимости рассеяния (а) и эквивалентная схема магнитной цепи (б) для области 3

Fig. 8. Elementary scattering conductivities (a) and the equivalent circuit of the magnetic circuit (b) for area 3

На рис. 6–9: $dG'_{m1(2)}$, $dG''_{m1(2)}$ – элементарная проводимость участка ПМ по пути потоков краевого эффекта $\Phi_{\sigma}^{z1(2)}$ и воздушного зазора $\Phi_{\sigma}^{z1(2)}$ соответственно; $dG'_{air1(2)}$, $dG''_{air1(2)}$ – то же участков по воздуху по пути потоков краевого эффекта $\Phi_{\sigma}^{z1(2)}$ и воздушного зазора $\Phi_{\sigma}^{z1(2)}$ соответственно; $b_{ПМ}$ – ширина ПМ, м; b_{Δ} – ширина межполюсного участка, м; Δx – изменение координаты положения ротора относительно положения статора, м; $h_{ПМ}$ – толщина ПМ, м; δ – величина воздушного зазора, м; $r_{\sigma 1}^{z1(2)}$, $r_{\sigma 2}^{z1(2)}$ –

внутренний и наружный радиусы, ограничивающие зону потоков рассеяния через зубец, м; $\chi_{\sigma}^{z1(2)}$ – часть ПМ, находящаяся в рабочем воздушном зазоре и зоне потока рассеяния через зубец, м.

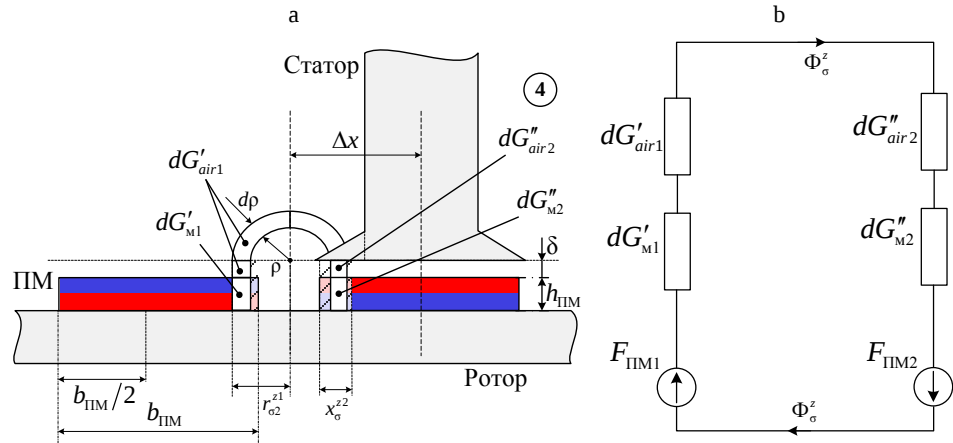


Рис. 9. Элементарные проводимости рассеяния (а) и эквивалентная схема магнитной цепи (b) для области 4

Fig. 9. Elementary scattering conductivities (a) and the equivalent circuit of the magnetic circuit (b) for area 4

При перемещении подвижной части $r_{\sigma 1}^{z1(2)}$, $r_{\sigma 2}^{z1(2)}$, $\chi_{\sigma}^{z1(2)}$ зависят от координаты положения ротора. Каждая пара элементарных проводимостей для бесконечно тонкого слоя $d\rho$ или dx состоит из двух последовательно соединенных участков: воздушного промежутка и ПМ [13]. Полагаем, что элементарные магнитные проводимости рассеяния по воздуху представляются в виде тонких слоев $d\rho$, ограниченных дугами окружностей радиуса ρ , сопряженных с небольшими прямолинейными участками, а в зоне воздушного зазора – только прямолинейными участками [13].

Элементарные проводимости рассеяния эквивалентных схем магнитных цепей носят один и тот же характер (рис. 8b, 9b). Поэтому целесообразно эквивалентные схемы магнитных цепей с элементарными проводимостями рассеяния (рис. 6b, 7b, 8b, 9b) представить в виде рис. 10.

Суммарные элементарные магнитные проводимости рассеяния по путям магнитных потоков $\Phi_{\sigma}^{z1(2)}$, $\Phi_{\sigma}^{z1(2)}$, Φ_{σ}^z .

$$dG_{\sigma 1(2)}'^z = dG_{m1(2)}' dG_{air1(2)}' \left(dG_{m1(2)}' + dG_{air1(2)}' \right)^{-1}; \quad (1)$$

$$dG_{\sigma 1(2)}''^z = dG_{m1(2)}'' dG_{air1(2)}'' \left(dG_{m1(2)}'' + dG_{air1(2)}'' \right)^{-1}; \quad (2)$$

$$dG_{\sigma 1(2)}^z = dG_{\sigma 1(2)}'^z + dG_{\sigma 1(2)}''^z. \quad (3)$$

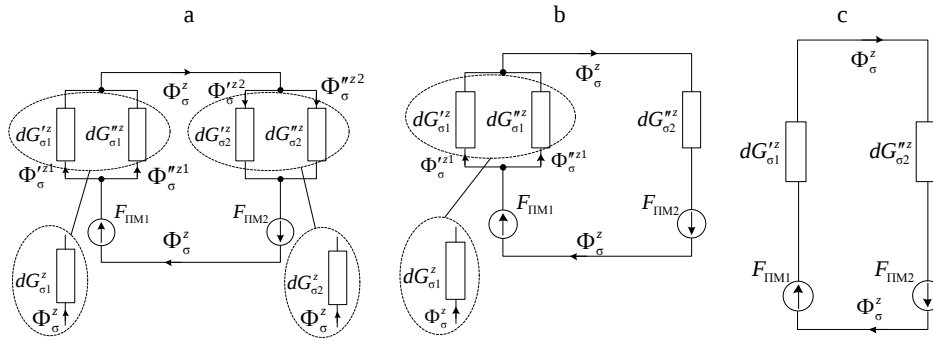


Рис. 10. Преобразованные эквивалентные схемы магнитных цепей с элементарными проводимостями рассеяния для области: а – 1; б – 2; с – 3, 4

Fig. 10. Transformed equivalent circuits of magnetic circuits with elementary scattering conductivities for area: а – 1; б – 2; с – 3, 4

Порядок расчета элементарных проводимостей рассеяния. Элементарные магнитные проводимости рассеяния представим в следующем виде:
– для области 1:

$$dG'_{m1(2)} = \frac{\mu_r l d\rho_{1(2)}}{h_{\Pi M}}; \quad dG'_{air1(2)} = \frac{\mu_0 l d\rho_{1(2)}}{\delta + 0,5\pi\rho_{1(2)}};$$

$$dG''_{m1(2)} = \frac{\mu_r l dx_{1(2)}}{h_{\Pi M}}; \quad dG''_{air1(2)} = \frac{\mu_0 l dx_{1(2)}}{\delta}; \quad (4)$$

– для области 2:

$$dG'_{m1} = \frac{\mu_r l d\rho_1}{h_{\Pi M}}; \quad dG'_{air1} = \frac{\mu_0 l d\rho_1}{\delta + 0,5\pi\rho_1};$$

$$dG''_{m1(2)} = \frac{\mu_r l dx_{1(2)}}{h_{\Pi M}}; \quad dG''_{air1(2)} = \frac{\mu_0 l dx_{1(2)}}{\delta}; \quad (5)$$

– для области 3:

$$dG'_{m1} = \frac{\mu_r l d\rho_1}{h_{\Pi M}}; \quad dG'_{air1} = \frac{\mu_0 l d\rho_1}{\delta + 0,5\pi\rho_1}; \quad dG''_{m2} = \frac{\mu_r l dx_2}{h_{\Pi M}}; \quad dG''_{air2} = \frac{\mu_0 l dx_2}{\delta}; \quad (6)$$

– для области 4:

$$dG'_{m1} = \frac{\mu_r l d\rho_1}{h_{\Pi M}}; \quad dG'_{air1} = \frac{\mu_0 l d\rho_1}{\delta + \pi\rho_1}; \quad dG''_{m2} = \frac{\mu_r l dx_2}{h_{\Pi M}}; \quad dG''_{air2} = \frac{\mu_0 l dx_2}{\delta}, \quad (7)$$

где μ_r – внутренняя проницаемость ПМ, Гн/м; l – длина ПМ в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка (эффективная длина), м; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

С учетом выражений (1), (2) получим:

– для области 1:

$$dG'_{\sigma 1(2)} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \left(\frac{d\rho_{1(2)}}{a + \rho_{1(2)}} \right); \quad dG''_{\sigma 1(2)} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{dx_{1(2)}}{a}, \quad (8)$$

где $a = 2\pi^{-1}(\mu_0\mu_r^{-1}h_{\text{ПМ}} + \delta)$;

– для области 2:

$$dG'_{\sigma 1} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \left(\frac{d\rho_1}{a + \rho_1} \right); \quad dG''_{\sigma 1(2)} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{dx_{1(2)}}{a}; \quad (9)$$

– для области 3:

$$dG'_{\sigma 1} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \left(\frac{d\rho_1}{a + \rho_1} \right); \quad dG''_{\sigma 2} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{dx_2}{a}; \quad (10)$$

– для области 4:

$$dG'_{\sigma 1} = \frac{\mu_0 l}{\pi} \left(\frac{d\rho_1}{a_* + \rho_1} \right); \quad dG''_{\sigma 2} = \frac{\mu_0 l}{\pi} \frac{dx_2}{a_*}, \quad (11)$$

где $a_* = \pi^{-1}(\mu_0\mu_r^{-1}h_{\text{ПМ}} + \delta)$.

Проведя интегрирование (8)–(11), получим:

– для области 1:

$$G'_{\sigma 1(2)} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \ln \left(\frac{a + r_{\sigma 2}^{z1(2)}}{a + r_{\sigma 1}^{z1(2)}} \right); \quad G''_{\sigma 1(2)} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{x_{\sigma}^{z1(2)}}{a}; \quad (12)$$

– для области 2:

$$G'_{\sigma 1} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \ln \left(\frac{a + r_{\sigma 2}^{z1}}{a + r_{\sigma 1}^{z1}} \right); \quad G''_{\sigma 1(2)} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{x_{\sigma}^{z1(2)}}{a}; \quad (13)$$

– для области 3:

$$G'_{\sigma 1} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \ln \left(\frac{a + r_{\sigma 2}^{z1}}{a + r_{\sigma 1}^{z1}} \right); \quad G''_{\sigma 2} = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{x_{\sigma}^{z2}}{a}; \quad (14)$$

– для области 4:

$$G'_{\sigma 1} = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \left(\frac{a_* + r_{\sigma 2}^{z1}}{a_* + r_{\sigma 1}^{z1}} \right); \quad G''_{\sigma 2} = \frac{\mu_0 l}{\pi} \frac{x_{\sigma}^{z2}}{a_*}. \quad (15)$$

Из (12)–(15) с учетом (3) получим полные проводимости рассеяния $G_{\sigma 1}^z, G_{\sigma 2}^z$:

– для области 1:

$$G_{\sigma 1(2)}^z = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \ln \left(\frac{a + r_{\sigma 2}^{z1(2)}}{a + r_{\sigma 1}^{z1(2)}} \right) + \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{x_{\sigma}^{z1(2)}}{a}; \quad (16)$$

– для области 2:

$$G_{\sigma 1}^z = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \ln \left(\frac{a + r_{\sigma 2}^{z1}}{a + r_{\sigma 1}^{z1}} \right) + \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{x_{\sigma}^{z1}}{a}; \quad G_{\sigma 2}^z = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{x_{\sigma}^{z2}}{a}; \quad (17)$$

– для области 3:

$$G_{\sigma 1}^z = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \ln \left(\frac{a + r_{\sigma 2}^{z1}}{a + r_{\sigma 1}^{z1}} \right); \quad G_{\sigma 2}^z = \frac{\mu_0 l}{0,5\pi} \frac{x_{\sigma}^{z2}}{a}; \quad (18)$$

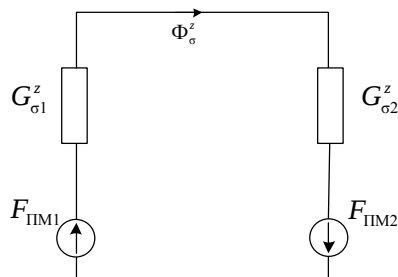
– для области 4:

$$G_{\sigma 1}^z = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \left(\frac{a_* + r_{\sigma 2}^{z1}}{a_*} \right); \quad G_{\sigma 2}^z = \frac{\mu_0 l}{\pi} \frac{x_{\sigma}^{z2}}{a_*}. \quad (19)$$

На рис. 11 представлена эквивалентная схема магнитной цепи с учетом (16)–(19) для расчета полных проводимостей рассеяния по путям потока через зубец статора СЭМ с ДЗО.

Рис. 11. Эквивалентная схема магнитной цепи с полными проводимостями рассеяния

Fig. 11. Equivalent circuit of a magnetic circuit with total scattering conductivities



Для определения потока Φ_{σ}^z с учетом эквивалентной схемы магнитной цепи (рис. 11) составим уравнение равновесия МДС:

$$F_{\Pi M 1} + F_{\Pi M 2} = \Phi_{\sigma}^z (G_{\sigma 1}^z + G_{\sigma 2}^z) (G_{\sigma 1}^z G_{\sigma 2}^z)^{-1}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что магнитный поток рассеяния через зубец

$$\Phi_{\sigma}^z = G_{\sigma 1}^z G_{\sigma 2}^z (G_{\sigma 1}^z + G_{\sigma 2}^z)^{-1} (F_{\Pi M 1} + F_{\Pi M 2}). \quad (21)$$

Результаты моделирования

Проверку адекватности аналитических выражений для определения магнитного потока рассеяния через зубец статора СЭМ с ДЗО корректно проводить в сравнении с результатами расчета посредством численного метода (метода конечных элементов). Расчет проводится для СЭМ с ДЗО

с внешним ротором и радиально намагниченными ПМ ($q = 2/7$, рис. 1). Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования
Initial data for modeling

Наименование параметра	Значение
Число зубцов статора z_1	12
Число полюсов статора $2p$	14
Радиус статора, м	$11,35 \cdot 10^{-3}$
Эффективная длина l , м	$12,5 \cdot 10^{-3}$
Толщина ярма магнитопровода ротора, м	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Толщина ярма магнитопровода статора, м	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Величина воздушного зазора δ , м	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Толщина постоянного магнита $h_{\text{ПМ}}$, м	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Ширина постоянного магнита, м	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Остаточная магнитная индукция постоянного магнита B_r , Тл	1,1
Ширина паза статора, м	$2,4 \cdot 10^{-3}$
Ширина открытия паза статора, м	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Высота паза, м	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Материал постоянного магнита	NdFeB
Марка электротехнической стали	3406

На основе исходных данных построена ДКЭМ МП исследуемой СЭМ с ДЗО в режиме холостого хода (рис. 12) при различных положениях зубца статора относительно полюсов ротора.

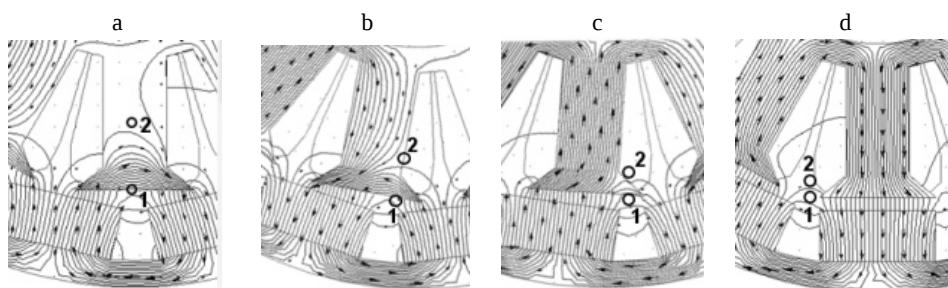


Рис. 12. Двумерная конечно-элементная модель магнитного поля синхронной электрической машины с дробными зубцовыми обмотками в режиме холостого хода:
а – область 1; б – 2; в – 3; г – 4

Fig. 12. Two-dimensional finite element model of the magnetic field of the electric machine with fractional gear winding in idle mode: а – area 1; б – 2; в – 3; г – 4

Максимальный и минимальный потоки рассеяния через зубец показаны на рис. 12а, д, промежуточные значения потока – на рис. 12б, в. Точки 1 и 2 выбраны вдоль оси пары полюсов на нижней кромке зубца и на границе потока рассеяния через зубец статора соответственно.

В таком случае поток рассеяния через зубец статора может быть рассчитан как

$$\Phi_{\sigma}^z = |A_1 - A_2|l, \quad (22)$$

где A_1, A_2 – магнитные векторные потенциалы в точках 1 и 2.

В табл. 2 приведены результаты расчета потоков рассеяния через зубец статора аналитическим и численным методами при различных положениях зубца статора относительно полюсов ротора (положения 1–4).

Таблица 2

Результаты расчета потока рассеяния через зубец статора аналитическим и численным методами

Results of calculating the scattering flux through the stator gear by analytical and numerical methods

№ положения зубца статора относительно полюсов ротора	Аналитический метод $\Phi_{\sigma}^z \cdot 10^{-6}$, Вб	Численный метод $\Phi_{\sigma}^z \cdot 10^{-6}$, Вб	Погрешность, %
1	23,66	25,12	5,8
2	14,65	15,50	5,5
3	4,81	5,04	4,6
4	0,98	1,05	6,7

Расхождение результатов, полученных посредством аналитического и численного методов, не превышает 7 %. Такая погрешность приемлема для большинства инженерных расчетов и обусловлена принятыми допущениями при построении эквивалентной схемы магнитной цепи исследуемой электрической машины.

ВЫВОДЫ

1. Выявлены особенности распределения магнитных потоков (основного, краевого эффекта, рассеяния) в магнитной системе синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками. Построены эквивалентные схемы магнитной цепи исследуемой электрической машины при различных положениях зубца статора относительно полюсов ротора и обоснована необходимость учета краевого эффекта и зависимости величины потока рассеяния через зубцы статора от координаты положения ротора.

2. Разработана аналитическая модель для определения потока рассеяния через зубцы статора синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками, учитывающая краевой эффект и зависимость величины потока рассеяния через зубцы статора от координаты положения ротора. Предложенная модель позволяет решить задачу количественного определения величины магнитного потока рассеяния через зубцы статора с высокой точностью. Практическая значимость разработанной аналитической модели заключается в возможности установления влияния геометрических параметров магнитной цепи на характер изменения периодической функции потока рассеяния через зубец статора с высокой точностью при наименьших временных затратах. Модель может применяться в процессе оптимизации синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока / А. И. Вольдек, В. В. Попов. СПб.: Питер, 2008. 350 с.
2. Levi, E. Multiphase Electric Machine for Variable Speed Applications / E. Levi // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, № 5. P. 1893–1909. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.918488>.
3. Шевченко, А. Ф. Электромеханические преобразователи энергии с модулированным магнитным потоком / А. Ф. Шевченко. Новосибирск: НГТУ, 1999. 340 л.
4. Сан, Ю. Погружные вентильные электродвигатели с зубцовым шагом обмотки статора / Ю. Сан. СПб.: СПбГМТУ, 2017. 153 л.
5. Менжинский, А. Б. Разработка уточненных электромагнитных моделей электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, П. Б. Менжинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 4. С. 291–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302>.
6. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
7. Балагуров, В. А. Электрические машины с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов; под ред. А. Н. Ларионова. М. – Л.: Энергия, 1964. 480 с.
8. Пантелеев, С. В. Разработка системы векторного управления полупроводникового преобразователя, обеспечивающей полигармонический режим работы многофазной электрической машины / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, А. Е. Каледа // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2020. Т. 65, № 3. С. 332–340. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-332-340>.
9. Иванов-Смоленский, А. В. Применение метода проводимостей зубцовых контуров для расчета синхронных машин с постоянными магнитами на поверхности ротора / А. В. Иванов-Смоленский, М. А. Аванесов, Е. В. Казьмин // Электричество. 2009. № 8. С. 42–51.
10. Ponomarev, P. Effect of Slot-and-Pole Combination on the Leakage Inductance and the Performance of Tooth-Coil Permanent-Magnet Synchronous Machines / P. Ponomarev, P. Lindh, J. Pyrhönen // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60, Iss.10. P. 4310–4317. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2216246>.
11. Пантелеев, С. В. Анализ особенностей магнитного поля синхронной электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой в полигармоническом режиме работы / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2021. Т. 66, № 3. С. 343–355. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-343-355>.
12. Честюнина, Т. В. Исследование многополюсных синхронных магнитоэлектрических генераторов с дробными зубцовыми обмотками / Т. В. Честюнина. Новосибирск: НГТУ, 2012. 176 л.
13. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. СПб.: Корона принт, 2013. 368 с.
14. Тарашев, С. А. Вентильный линейный генератор для систем электропитания автономных объектов / С. А. Тарашев. Самара, 2011. 129 л.
15. Бабилова, Н. Л. Генератор возвратно-поступательного движения в автономной системе электроснабжения маломощных потребителей / Н. Л. Бабилова. Уфа, 2009. 147 л.
16. ELCUT Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.3.1 [Электронный ресурс]. СПб.: Тор, 2018. Режим доступа: https://elcut.ru/downloads/manual_r_pocket.pdf. Дата доступа: 24.05.2018.
17. Менжинский, А. Б. Математическая модель генератора комбинированной конструкции возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // Вестник Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2018. № 2. С. 74–85.
18. Синицин, А. П. Совершенствование линейных генераторов с постоянными магнитами для автономных объектов / А. П. Синицин. Самара, 2013. 124 л.
19. Хвалин, Д. И. Моделирование электромагнитного поля мощной электрической машины / Д. И. Хвалин, О. Г. Кенсицкий, К. А. Кобзарь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 130–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142>.

Поступила 04.11.2021 Подписана в печать 05.01.2022 Опубликовано онлайн 31.05.2022

REFERENCES

1. Vol'dek A. I., Popov V. V. (2008) *Electric Machines. AC Machines*. St. Petersburg, Peter Publ. 350 (in Russian).
2. Levi E. (2008) Multiphase Electric Machine for Variable Speed Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (5), 1893–1909. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.918488>.
3. Shevchenko A. F. (1999) *Electromechanical Energy Converters with Modulated Magnetic Flux*. Novosibirsk, NSTU. 340 (in Russian).
4. San Yu. (2017) *Submersible Valve Electric Motors with Gear Pitch of the Stator Winding*. St. Petersburg, SPSMTU. 153 (in Russian).
5. Menzhinski A. B., Malashin A. N., Menzhinski P. B. (2021) Development of Refined Electromagnetic Models of Reciprocating Electric Generators with Permanent Magnets. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (4), 291–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302> (in Russian).
6. Balagurov V. A., Galteev F. F. (1988) *Electric Machines with Permanent Magnets*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 280 (in Russian).
7. Balagurov V. A., Galteev F. F., Larionov A. N. (1964) *Electric Machines with Permanent Magnets*. Moscow–Leningrad, Energiya Publ. 480 (in Russian).
8. Pantelev S. V., Malashin A. N., Kaleda A. E. (2020) Development of a Vector Control System of the Semiconductor Converter which Will Provide a Polyharmonic Operating Mode of a Polyphase Electric Machine. *Vestsi Natsyonal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 65 (3), 332–340. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-332-340> (in Russian).
9. Ivanov-Smolenskii A. V., Avanesov M. A., Kaz'min E. V. (2009) Application of the Method of Conductivity of Gear Contours for Calculating Synchronous Machines with Permanent Magnets on the Surface of the Rotor. *Elektrichestvo [Electricity]*, (8), 42–51 (in Russian).
10. Ponomarev P., Lindh P., Pyrhönen J. (2013) Effect of Slot-and-Pole Combination on the Leakage Inductance and the Performance of Tooth-Coil Permanent-Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (10), 4310–4317. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2216246>.
11. Pantelev S. V., Malashin A. N. (2021) Analysis of Features of Magnetic Field of a Synchronous Electric Machine with a Multi-Phase Fractional Slot Winding in a Polyharmonic Mode of Operation. *Vestsi Natsyonal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 66 (3), 343–355. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-343-355> (in Russian).
12. Chestyunina T. V. (2012) *Research of Multipole Synchronous Magnetolectric Generators with Fractional Gear Windings*. Novosibirsk, NSTU. 176 (in Russian).
13. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. (2013) *Synchronous Electric Reciprocating Machines*. St. Petersburg, Korona-Print Publ. 368 (in Russian).
14. Tarashev S. A. (2011) *Valve Linear Generator for Power Supply Systems of Autonomous Objects*. Samara. 129 (in Russian).
15. Babikova N. L. (2009) *Generator of Reciprocating Motion in the Autonomous Power Supply System of Low-Power Consumers*. Ufa. 147 (in Russian).
16. ELCUT Modeling of Electromagnetic, Thermal, and Elastic Fields by the Finite Element Method [Electronic Resource]. Version 6.3.1. St. Petersburg, Tor Publ. 2018. Available at: https://elcut.ru/downloads/manual_r_pocket.pdf (Accessed 24 May 2018).
17. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Koval' Yu. G. (2018) Mathematical Model of the Generator of the Combined Design of Reciprocating Type. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. P. O. Sukhogo = Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel*, (2), 74–85 (in Russian).
18. Sinitsin A. P. (2013) *Improvement of Linear Generators with Permanent Magnets for Autonomous Objects*. Samara. 124 (in Russian).
19. Hvalin D. I., Kensytskiy O. H., Kobzar K. O. (2021) Simulation of Electromagnetic Field of a Powerful Electrical Machine. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 130–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>

UDC 697.34:004.75

An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System

A. V. Sednin¹⁾, A. V. Zherelo²⁾

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

²⁾Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Abstract. The article deals with the district heating systems transition to intelligent systems by developing a united information system and obtaining a high level of controllability of the entire system. During the implementation of automated control systems of district heating, a number of information tasks of the lower level are being introduced, including the data collection for thermal and hydraulic modes of operation for monitoring, operational management and analysis of the effectiveness. One of the problems of intelligent systems is data collection and its further storage and processing. Methods for data collection for real energy facilities are considered and the usage of multi-level system with the allocation of the upper level in the cloud storage has been proposed. In addition to the currently implemented data collection scheme in automated control systems, a generalized method of data acquisition with the introduction of duplicate streams has been proposed to ensure their integrity. The paper presents the approaches to identifying the collected data, ensuring the stability of the collection process, reliability of data storage and their integrity. Role-based security model with a dedicated single certification authority helps to protect data. Approaches to further processing of the collected data are shown, differing in the way of parallel data processing. The next stage of development is global monitoring systems that will be aimed to prompt response at all levels. The accumulated data will allow bringing the operating systems to a new level through the use of tools such as forecasting and simulation modeling, which will allow creating digital twins of heat supply systems. The proposed data collection system will perform forecasting and modeling at a higher level, and, as a result, help in the formation of more balanced management decisions.

Keywords: district heating systems, intelligent systems, process control systems, storage, simulation, monitoring, digital twin, distributed data processing, network topology, cloud computing

For citation: Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>

О подходе к обработке данных для интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения

А. В. Седнин¹⁾, А. В. Жерело²⁾

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

²⁾Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье рассматривается проблема перехода к интеллектуальным системам теплоснабжения за счет создания единого информационного пространства и достижения

Адрес для переписки

Седнин Алексей Владимирович
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 397-36-20
Sednin@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Alexei V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavistimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 397-36-20
Sednin@bntu.by

высокого уровня управляемости всей системы. В рамках внедрения проектов автоматизации технологических процессов решается ряд информационных задач нижнего уровня, в том числе по сбору данных о тепловых и гидравлических режимах работы объектов систем теплоснабжения для осуществления контроля, оперативного управления и анализа эффективности их функционирования. Одна из проблем интеллектуальных систем связана со сбором информации для ее дальнейшего хранения и обработки. Рассмотрены методы сбора информации на реальных энергетических объектах и предложено использовать многоуровневую систему с выделением верхнего уровня в облачное хранилище. Реализованная в настоящее время схема сбора данных в автоматизированных системах управления теплоснабжением может быть дополнена обобщенным методом аккумуляции данных с введением дублирующих потоков, позволяющих обеспечить их целостность. Предложены подходы к идентификации собираемых данных, обеспечению устойчивости процесса сбора, надежности хранения и целостности. Для защиты данных можно использовать ролевую модель безопасности с выделенным единым центром сертификации, а также параллельную обработку данных. Следующий этап развития – создание систем глобального мониторинга, деятельность которых направлена на оперативное реагирование на всех уровнях. Аккумулируемый массив данных позволит вывести эксплуатируемые системы на новый уровень за счет использования таких инструментов, как прогнозирование и имитационное моделирование, и создать цифровые двойники систем теплоснабжения. Дополнительное преимущество создаваемой системы сбора данных – возможность прогнозирования и моделирования на уровне выше отдельно взятой установки или предприятия и, как следствие, помощь в формировании более взвешенных управленческих решений.

Ключевые слова: системы централизованного теплоснабжения, интеллектуальные системы, автоматизированная система управления, хранение, имитационное моделирование, мониторинг, цифровой двойник, распределенная обработка данных, топология вычислительной сети, облачные вычисления

Для цитирования: Седнин, А. В. О подходе к обработке данных для интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения / А. В. Седнин, А. В. Жерело // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>

Introduction

District heating systems (DHS) has a great potential to be one of the main parts of future low-carbon energy systems [1]. The implementation of smart energy systems is a key factor of fulfilling the objectives of future low-carbon strategies [2–3]. As it stressed in [4], the smart energy system concept represents a transition from single-sector development to a coherent energy systems and understanding of how to benefit from the integration.

Through the information network, different parts of DHS (thermal source, network of pipes, substation, and heat user) are connected together and integrated into a long-distance management controlled and intelligent system [5, 6]. The automated control systems for technological processes are being replaced by intelligent control systems with a multi-parameter industrial computer and controllers that provide control of technological processes based on big data analysis. Numerous sensors and devices need to be installed to secure the data collection [7]. The system obtains the real-time data from different parts and builds a running database, in order to realize the storage and analysis of all the information on a uniform platform of management in accordance with algorithms of processing and analyzing big data [8]. Based on the smart district heating system, the smart forecasting of load, the smart regulation of heat,

the smart optimization of scheduling and the smart diagnosis of fault could be realized [5].

Digital technologies have been seen to be effective as an enabler of innovation across various economic sectors [9]. A wider implementation of information and communication technologies opens up for better network management based on real time measurement data and for the integration of new digital business processes. Digitalization or the wide implementation of digital technologies in energy systems are believed to make systems smarter, more efficient and reliable [10]. According to [11] for design smart thermal grids implementation of real-time operation monitoring shall ensure that all technological process is being performed according to the plan. Aggregating data and performing operational analytics are necessary.

According to [10] the digitalization in district heating systems is demanding a large number of different sensors, automated data storage and analyses systems. Data collection and storage is the first step of proposed in [10] basic structure of methodology of identifying efficiency potentials through digitalization of district heating.

Information structure and data collecting methods

This article aims to offer some opportunities for data collection and storage systems for smart district heating. The entire information that can be obtained from the object can be divided into two main classes:

- objective data – the information collecting from sensors and presented by personnel and representing some physical parameters of the investigated object, for example, temperature, pressure, etc.;
- expert data – information generated by personnel, which cannot be expressed in numerical form or in the case when it is formed on the basis of value judgments.

Taking into account the proposed ways of collecting data, the following methods can be introduced: automated, based on sensors measurements; manual, based on application, which helps personnel to enter the necessary data.

Globally, the current trend is the transition to complete automation of the data collection with the formation of the Internet of Things (IoT).

It is proposed to use a multi-level system, where at the lower level of installations, information is obtained from sensors and operators, and the high level is a cloud data storage, which is referred as DataLake [12].

Intermediate levels are aggregation levels for grouping an incoming data according to some criterion (for example, territorial) in order to ensure the possibility of a prompt response, preliminary processing, additional control and recovery of the general data array.

Fig. 1a shows generalized diagram of data collection with main data streams. Note, it is proposed to use actually two duplicate data streams, one of which is organized traditionally, i. e. hierarchically, and the second one is a generalized bus through which data is transmitted immediately to all levels. Implementing

this scheme, the main load of data transmission is assigned precisely to the second stream, while hierarchical data transmission is used primarily to ensure data integrity.

Currently, within the development of automated control system of Minsk district heating system (DHS), the lower level of data collection has been implemented [13–14]. The implemented control system primarily aims to increase reliability and quality of operational control for different parts of DHS. Simultaneously, a number of information and technological tasks are being solved, including the data collection and archiving representing the information about thermal and hydraulic regimes of heat sources, heat pipelines, pumping stations. These data are necessary for monitoring, operational management and analysis of the DHS efficiency. The process of creating the information base for solving optimization problems is also underway.

In the compound software complex of DHS, it is necessary to select monitoring servers (usually two servers), which completely duplicate each other's functions and are interchangeable [15]. The exchange with data users external to the software and hardware complex is carried out through an intermediate server – a retranslation server. Fig. 1b shows the general scheme of data collection in the process control system. It should be noted that a bi-directional flow of information exchange is essentially organized between the monitoring servers, while the relay server can only receive information and this is limited due to the use of the internal data request protocol.

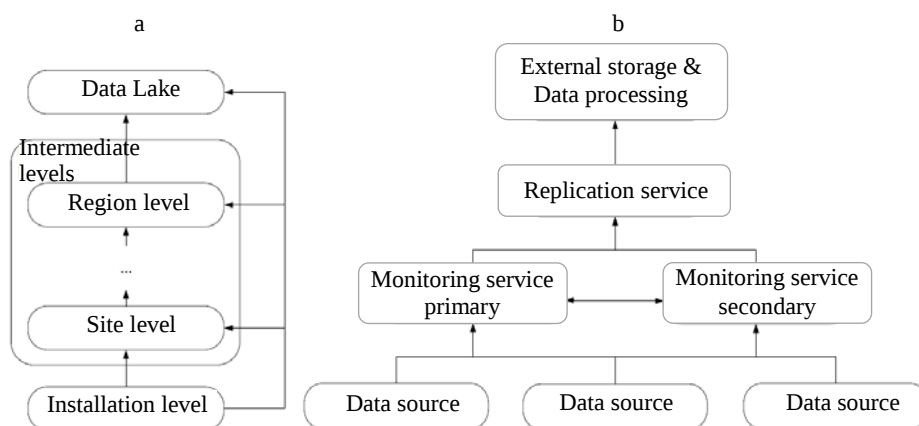


Fig. 1. Generalized diagram of data collection (a) and general scheme of data collection in the process control system (b)

Regardless of the methods of data collection, the main problem in their aggregation is the identification of data in the total volume. In this direction, it is proposed to use a hierarchical approach to identifying a chunk of data based on digital lines. In this paper, we propose the following general approach to the formation of an identifier:

- CC – country;
- DD – department;
- RRR – region;
- TT – type of installation;

- NN – number of installation;
- IIIIII – data source device number.

Then the identifier can be expressed as CCDDRRRTTNNIIIIII.

In the above identifier, each digit represents the number 0–9, since in the future it is supposed to use these identifiers in the form of linear bar-codes in order to simplify the maintenance of the information system being created (for example, search and identification of sensors/objects in case of need for repair or replacement).

The data volume that needs to be collected and processed is a classic BigData problem [12]. It is quite difficult to estimate directly the volume of data coming from one installation, because it depends on number of information sources and the time rate which the data are collected with. Two ways of collecting information can be proposed. In the first case, at the initial phase data is preliminary filtered and processed and then sent to the storage system. The second approach is based on the collection of the “raw” data with subsequent processing and using dedicated computing resources.

The first approach significantly reduces the requirements for data communication channels and computing resources used for following data storage and processing. However, at the stage of system deployment, this approach is rather difficult to use, since the quality of the collected data directly depends on the formed rules of the primary processing and, accordingly, in the process of the subsequent analysis, some important patterns will not be revealed. Therefore, at the stage of the initial implementation of the information collection system, it is better to use the second approach, although it is more demanding on resources.

Ensuring the sustainability of the data collection process

While collecting data, especially telemetry, it is necessary to highlight the formation of time series that correctly reflect the operation of the observed object. It is well known that gaps in the observed time series significantly complicate subsequent analysis and lead to filter out data or generate gaps. Such problems may occur due to the territorial distribution of the data collection system and the need to use the data communication channels of the third-party organizations, which may be either unstable or do not provide the required bandwidth.

To solve above the mentioned problems, it is useful to build a multi-level two-channel hierarchical data collection system using an intermediate storage. The key part of the proposed collection system is that data transmitted simultaneously through two logical channels. The first channel (I) transfers data to all intermediate data storage systems, and directly to the DataLake located in the cloud. The second channel (II) sequentially aggregates data to the enterprise-level storage, and then transfers it to the intermediate-level storage, for example, regional, etc. These channels are a technical implementation of the generalized data collection scheme shown in Fig. 1.

Transmitting data through the first channel could lead to possible loss due to the use of unstable communication lines, but this channel cannot be abandoned, since it provides information necessary for possible operational control. To eliminate the problem of completeness of incoming data, the second data transmission channel will be used, where local storage will be rewritten only after confirmation that data is transferred to the higher level.

Fig. 2 shows the approximate diagram of data transmission channels. In particular, only one intermediate level “Region” is used. The number of intermediate levels can be increased. Channels (II) are marked with double-headed arrows, supposed that they can be used in both directions. Since this channel, as mentioned above, will be used primarily to ensure data integrity, to organize data transmission, it will use session-type protocols based on the use of TCP as a transport layer protocol.

Channels (I) imply the immediate data transfer over the generalized bus at once to all points in the hierarchy. For this type of transmission, in order to reduce the load on transport networks and transmitting nodes, it is proposed to use protocols that do not establish connection and control data delivery, as well as that allow multicast broadcasting (for example, protocols based on the use of UDP). With this approach, partial data loss is possible. To eliminate this problem, it is also proposed to use channels (II). If the upstream density is high, it is technically possible to implement several independent buses for transmitting data to the cloud, uniting, for example, geographically localized resources (Fig. 2).

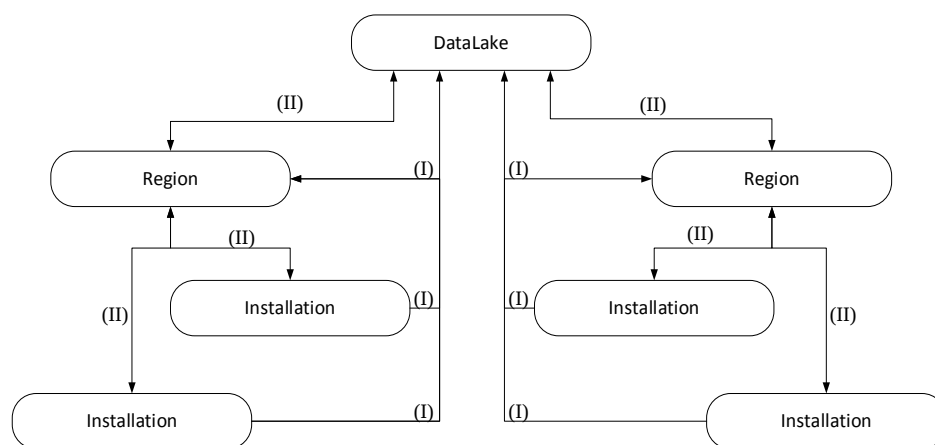


Fig. 2. An example of a data transmission channel organization scheme

Due to the importance of the processed data, it is necessary to ensure reliable storage at all system levels. At the level of an individual installation, like boiler-house, it is possible to use hardware data backup systems, for example, RAID of various modifications [16], which is currently used in automated control system for Minsk DHS. In the case of large volumes, it is possible to use storage systems such as SAN [16].

However, at the upper levels, the total amount of data and the necessity of data processing requires the organization of storage reflection on distributed file systems, for example, Hadoop, Ceph, Gluster, etc. [17, 18]. Note that file systems of this type are already focused on ensuring reliable storage and allow setting the administrative factor of replication of stored data. Due to the peculiarities of the implementation of distributed file systems, access to stored data naturally reflects on the cloud infrastructure. The technical implementation of the access points to cloud resources can be realized in many ways, which increases the fault tolerance of the information collection process.

Data processing

Perhaps the processing of collected data is the main problem of the proposed system. The total amount of incoming data is large, so the dimension reduction could be possible, especially for solving the time restriction problems (for example, forecasting or control). Currently the dimension reduction is carried out according to the expert judgment, but, the amount of information that an expert can operate on is limited.

The purpose of collecting and processing data systems for industry is to accumulate the complete information for decision-making process. Even for full-accumulated information, there is a problem of insufficient computing resources to perform the required tasks such as searching, filtering data and calculating the simplest statistical indicators.

Here two approaches can be proposed. The first one involves the creation of a single computing center with significant computing resources in the form of the dedicated computing cluster. This approach is beneficial when it is necessary to carry out constant massive calculations (for example, as in meteorology). The essence of this approach is data transfer of to the point of computation.

The second approach is based on performing computations simultaneously with data storage, particularly for tasks related to primary data processing, since it does not require significant investments in computing infrastructure. It is more flexible due to the possibility to increase computing performance and storage space. For example, Hadoop framework could be used, which allows to solve problems both for storing large amounts of data, and for processing chunks of data directly at the nodes of storage.

The protection of communication channels is supposed to implement both at the physical level, by organizing isolated or dedicated communication channels, and at the presentation level, based on encryption of transmitted data. To organize data encryption and provide a unified network infrastructure the use of VPN with channel identification by a cryptographic key is more appropriate [19].

To protect data, a role-based security model with a dedicated single certification authority is proposed. Currently, in embed automated control system for Minsk DHS; such center operates in offline mode, while electronic keys are used for personal providing their authorization and authentication. However, if data processes in DataLake, due to the impossibility of determination of specific place for direct data processing, it is necessary to move to the online center. To consolidate information about users, their interconnections and rights, it is necessary to use a resource directory with standard interface, such as lightweight directory access protocol (LDAP).

Currently, a transition from reactive systems to proactive is required. Direct data collection and management system is not sufficient. The system should support operational and management decisions. Such systems demand significant resources, and some steps of building the system cannot be carried out in parallel due to the existing dependencies between them (for example, it is impossible to go to the modeling stage passing the data processing).

Fig. 3 shows the directions of development of the data processing.

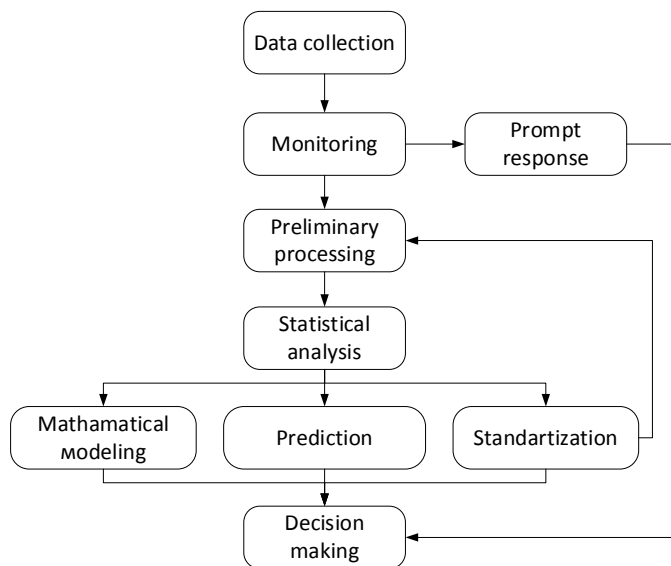


Fig. 3. Development of the data processing

At the moment, the data collection has been implemented and local monitoring tools allow prompt response to events reflected in the system at the local level (installation level). At the next stages, it is necessary to build up the monitoring system for the operational decision not only at the enterprise level, but also at the regional and global levels, as well as the introduction of primary data processing systems, for filtering, data validation and further analysis. As mentioned above, it is difficult to process data at the enterprise level due to the large amount and the variety of possible criteria, while a cloud solution allows processing with the involvement of additional computing resources on the temporary or permanent basis, for example, using MapReduce or Spark technologies [20].

After the preliminary data processing, statistical processing is possible, which helps to identify non-obvious patterns and relations in industrial process. The additional advantage of global data storage and processing is the possibility of deep comparative analysis of installations, industrial enterprises, regions, etc., which is impossible with the traditional approaches that do not stimulate the exchange of experience and the introduction of universal management solutions.

The proactive approach allows making actions to control the ongoing processes without expecting the occurrence of some event. At the moment, the elements of a proactive approach have been introduced into the implemented system, for example, there are preventive measures aimed at preventing emergencies. However, due to the complexity of the systems in operation, the competence and responsibility of personnel have a significant impact on reliability. The accumulated data storage will allow bringing the operating systems to a new level through the use of tools such as forecasting and modeling, and, as a result, the allocation of priority areas. For technological forecast it is advisable to use both classical approaches based on statistical approaches (for example, time series analysis) and relatively new methods for processing intelligent data (for example,

using neural network approaches) [21], which will allow cross-checking the results obtained on different stages.

Mathematical and imitating modeling based on the mathematical formalization of physical processes is another important element of the proactive approach. The imitating modeling is aimed to produce the mathematical model that describes the functioning of the modeled system and its components as fully as possible, which is often called the digital twin of the system. They are continuously adapting to the current status of the system to ensure the ongoing accuracy with regard to the system status.

To describe a number of physical processes, without possibility to collect the information, it becomes necessary to switch to mathematical modeling. Regardless of the chosen modeling approach, it is not usually possible to conduct this type of research within enterprise due to the lack of necessary computing resources and the lack of personnel with the appropriate competencies, and, as a result, the joint work of specialists from various fields of science and industry is required.

CONCLUSIONS

1. District heating systems have a great potential and will remain one of the main parts of future low-carbon energy systems. The implementation of smart energy systems needs the real-time data from different parts and builds a running database, in order to realize the storage and analysis of all the information on a uniform platform of management in accordance with algorithms of processing and analyzing big data.

2. Based on current experience of data collection process while introducing automated control system of Minsk district heating system, a generalized method of data acquisition with the duplicate streams is proposed to ensure their integrity. The accumulated data will allow bringing the operating systems to a new level through the use of tools such as forecasting and simulation modeling, which will allow creating digital twins of heat supply systems.

3. For proposed data collection systems different aspects was discussed, such as data identification, storage volume, ensuring the sustainability, reliable storage and data integrity, data processing. The principles of development of data collection system were formed, focused on possible processing by using the existing technologies. The proposed approaches can be used in the formation of technical requirements for industry systems focused on the cloud technologies.

REFERENCES

1. Lund H., Østergaard P. A., Nielsen T. B., Werner S., Thorsen J. E., Gudmundsson O., Arabkoohsar A., Mathiesen B. V. (2021) Perspectives on Fourth and Fifth Generation District Heating. *Energy*, 227, 120520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>.
2. Bezhan A. V. (2020) Performance Improvement of Heat Supply Systems Through the Implementation of Wind Power Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 285–296. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-285-296> (in Russian).
3. Sednin V. A., Bubyry T. V. (2019) Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*

- i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76> (in Russian).
4. Lund H., Duic N., Østergaard P. A., Mathiesen B. V. (2018) Future District Heating Systems and Technologies: on the Role of Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating. *Energy*, 165A, 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
 5. Gao L., Cui X., Ni J., Lei W., Huang T., Bai C., Yang J. (2017) Technologies in Smart District Heating System. *Energy Procedia*, 142, 1829–1834. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.571>.
 6. Grzegórska A., Rybarczyk P., Lukoševičius V., Sobczak J., Rogala A. (2021) Smart Asset Management for District Heating Systems in the Baltic Sea Region. *Energies*, 14 (2), 314. <https://doi.org/10.3390/en14020314>.
 7. Voropay N. I., Gubko M. V., Kovalev S. P., Massel' L. V., Novikov D. A., Raikov A. N., Senderov S. M., Stennikov V. A. (2019) Digital Energy Development Problems in Russia. *Problemy Upravlenniya = Control Sciences*, (1), 2–14. <https://doi.org/10.25728/pu.2019.1.1> (in Russian).
 8. Kopaygorodsky A.N., Mamedov T.G. (2020) Architecture of the Intellectual Information System to Support Expert Decisions on Strategic Innovative Energy Development. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 4 (20) 168–176. <https://doi.org/10.38028/ESI.2020.20.4.015>.
 9. Onile A. E., Machlev R., Petlenkov E., Levron Y., Belikov J. (2021) Uses of the Digital Twins Concept for Energy Services, Intelligent Recommendation Systems, and Demand Side Management: A Review. *Energy Reports*, 7, 997–1015. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.090>.
 10. Schmidt D. (2021) Digitalization of District Heating and Cooling Systems. *Energy Reports*, 7 (4), 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.082>.
 11. Lorenzen P., Janßen P., Winkel M., Klose D., Kernstock P., Schrage J., Schubert F. (2018) Design of a Smart Thermal Grid in the Wilhelmsburg District of Hamburg: Challenges and Approaches. *Energy Procedia*, 149, 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.214>.
 12. Mikheev A. V. (2020) Big Data Analysis for Innovation Development Decision Making in Energy Sector. *Informatsionnye i Matematicheskie Tekhnologii v Nauke i Upravlenii = Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, (4), 158–167. <https://doi.org/10.38028/ESI.2020.20.4.014> (in Russian).
 13. Sednin V. A., Sednin A. V. (2020) Reconstruction of Heat Sources of the Minsk Thermal Networks Branch of Minskenergo RUE. *Energeticheskaya Strategiya [Power Engineering Strategy]*, (6), 16–22 (in Russian).
 14. Sednin V. A., Sednin A. V. (2005) Automatic Control System of Regional Boiler House. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 53–60 (in Russian).
 15. Sednin V. A., Gutkovskii A. A. (2016) Modernization and Automation of the Heat Supply System. The Experience of Belarus. *Energoberezhenie [Energy Saving]*, (8), 46–52 (in Russian).
 16. Tate J., Beck P., Ibarra H. H., Kumaravel S., Miklas L. (2017) *Introduction to Storage Area Networks*. IBM Redbooks. Available at: <https://www.redbooks.ibm.com/redbooks/pdfs/sg245470.pdf>.
 17. Sajwan V., Yadav V., Haider M. (2015) The Hadoop Distributed File System: Architecture and Internals. *International Journal of Combined Research & Development (IJCRD)*, 4 (3), 541–544.
 18. Oh M., Park S., Yoon J., Kim S., Lee Kang-won, Weil S., Yeom H., Jung M. (2018). Design of Global Data Deduplication for a Scale-Out Distributed Storage System. *IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, 2–6 July 2018, 1063–1073. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2018.00106>.
 19. Druk E. V., Levko I. V. (2019) Fundamentals of VPN-Networks Organization and Management for Special Purposes in Modern Information Systems. *T-Comm – Telekommunikatsii i Transport = T-Comm*, 13 (6), 19–29. <https://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10276> (in Russian).
 20. Buyya R., Broberg J., Goscinski A. (2011) *Cloud Computing: Principles and Paradigms*. Hoboken, John Wiley & Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470940105>.
 21. Nikolenko S. (2018) *Deep Learning*. St. Petersburg, Peter Publ. 480 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-250-262>

УДК 536.24:621.577.012-837

Приближенный тепловой расчет конденсатора перегретого пара тепловых насосов

В. И. Володин¹⁾, С. В. Здитовецкая¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Приведен сравнительный анализ методик приближенного теплового расчета конденсатора перегретого пара парокомпрессионного теплового насоса системы теплоснабжения. Рабочее вещество теплового насоса и конденсирующегося пара – хладагент R410a. При однозонной методике конденсатор рассчитывается по одному участку с включением теплоты перегрева в теплоту конденсации и использованием коэффициента перегрева. Двухзонная методика предполагает расчет конденсатора по двум отдельным участкам: охлаждения перегретого пара и собственно его конденсации. Апробация проводилась при численном исследовании конденсатора низкотемпературной теплонасосной системы отопления и горячего водоснабжения с поверхностью теплообмена в виде спирального змеевика труба в трубе, погруженного в нагреваемую жидкость. В первом подходе расход и температура нагреваемой воды ограничены температурой насыщения конденсирующегося хладагента независимо от схемы течения рабочих сред. Методика двухзонного расчета конденсатора перегретого пара с противоточной или перекрестно-противоточной схемой течения рабочих сред позволяет получить реальные результаты по температуре нагреваемой воды, превышающей температуру насыщенного пара хладагента, с учетом расхода нагреваемой воды. В данном случае температура стенки на участке охлаждения выше температуры насыщения, а при конденсации – ниже, что дополнительно подтверждает адекватность данной методики. Использование двухзонной методики с отдельным усреднением физических свойств рабочих сред на участках охлаждения перегретого пара и конденсации, а также температурных напоров дает более точное значение поверхности теплообмена, которая в рассмотренном случае уменьшается до 20 %. На основании проведенных исследований рекомендуется использовать двухзонную методику, позволяющую получить достоверные данные о параметрах конденсатора перегретого пара.

Ключевые слова: конденсатор, тепловой насос, хладагент, теплоснабжение, конденсация, перегретый пар, физические свойства, теплопередача, температурный напор, поверхность теплообмена

Для цитирования: Володин, В. И. Приближенный тепловой расчет конденсатора перегретого пара тепловых насосов / В. И. Володин, С. В. Здитовецкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 250–262. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-250-262>

Адрес для переписки

Володин Виктор Иванович
Белорусский государственный
технологический университет
ул. Свердлова, 13А,
220006, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 397-49-33
volvic@mail.ru

Address for correspondence

Volodin Victor I.
Belarussian State
Technological University
13A, Sverdlova str.,
220006, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 397-49-33
volvic@mail.ru

Approximate Thermal Calculation of the Superheated Steam Condenser of Heat Pumps

V. I. Volodin¹⁾, S. V. Zditovetskaya¹⁾

¹⁾Belarussian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A comparative analysis of the methods of approximate thermal calculation of the superheated steam condenser of the steam compression heat pump of the heat supply system is presented. The working substance of the heat pump and the condensing steam is the refrigerant R410a. When the single-zone method is applied, the condenser is calculated by one area with the inclusion of the heat of overheating in the heat of condensation and the use of the overheating coefficient. The two-zone method assumes the calculation of the condenser in two separate areas, viz. the cooling of superheated steam and its actual condensation. The approbation was carried out during a numerical study of a condenser of a low-temperature heat pump system for heating and hot water supply, with a heat exchange surface in the form of a spiral coil pipe in a pipe immersed in a heated liquid. In the first approach, the flow rate and temperature of the heated water are limited by the saturation temperature of the condensing refrigerant, regardless of the flow pattern of the working media. The method of two-zone calculation of the superheated steam condenser with a counter-current or cross-counter-current flow scheme of working media makes it possible to obtain real results of the temperature of the heated water that exceeds the temperature of the saturated refrigerant vapor, taking into account the flow rate of the heated water. In this case, the wall temperature in the cooling area is higher than the saturation temperature, and during condensation it is lower, which further confirms the adequacy of the presented technique. The use of a two-zone technique with a separate averaging of the physical properties of the working media in the areas of superheated steam and condensation cooling, as well as temperature pressures, provides a more accurate value of the heat exchange surface, which in the case under consideration is reduced to 20%. Based on the conducted studies, it is recommended to use a two-zone technique that makes it possible to obtain reliable data on the parameters of the superheated steam condenser.

Keywords: condenser, heat pump, refrigerant, heat supply, condensation, superheated steam, physical properties, heat transfer, temperature pressure, heat exchange surface

For citation: Volodin V. I., Zditovetskaya S. V. (2022) Approximate Thermal Calculation of the Superheated Steam Condenser of Heat Pumps. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 250–262. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-250-262> (in Russian)

Введение

Парокомпрессионные тепловые насосы получили широкое распространение в системах теплоснабжения зданий [1, 2]. Мировой опыт показывает целесообразность их внедрения в низкотемпературных системах отопления и горячего водоснабжения. В Европе, где примерно 244 млн жилых зданий, доля рынка тепловых насосов в строительном фонде составляет около 6 %. Так, их продажи в 21 стране Европейского союза выросли в 2020 г. на 7,4 % (1,62 млн единиц) [3]. Поскольку ожидаемый срок службы тепловых насосов около 20 лет, их текущий европейский запас 14,86 млн единиц.

Конденсатор – один из основных элементов теплового насоса, во многом определяющий его технико-экономические показатели. В парокомпрессионных тепловых насосах на вход в конденсатор поступает перегретый пар после компрессора. В конденсаторах теплопроизводительностью до 20–30 кВт реализуется пленочная конденсация перегретого пара в горизонтальных трубах. Для проектирования конденсаторов и анализа их работы в составе тепловых насосов требуется адекватный метод их расчета. На практике для изучения процесса пленочной конденсации и обос-

нования завершенных проектных решений применяют двухмерные и одномерные локальные математические модели [4].

Интегральные методики расчета конденсаторов перегретого пара используют в нерасчетных режимах из-за простоты их адаптации к конкретным условиям эксплуатации. Учет перегрева пара при пленочной конденсации проводят введением поправок к расчетным формулам коэффициентов теплоотдачи насыщенного пара или разбиением поверхности конденсации на две зоны – охлаждения перегретого пара и конденсации. В первом случае предполагается, что конденсация перегретого пара начинается сразу при контакте с охлаждаемой поверхностью с температурой насыщения на свободной поверхности пленки конденсата, контактирующей с паром [5, 6].

При ламинарной пленочной конденсации, когда в формулу для расчета коэффициента теплоотдачи входит теплота конденсации, рекомендуют теплоту фазового перехода h_{fg} суммировать с теплотой перегрева [5, 6], т. е. использовать выражение $h'_{fg} = h_{fg} + c_{pR}(t_R - t_s)$, где c_{pR} – теплоемкость пара, Дж/(кг·°С); t_R , t_s – температура перегретого и насыщенного пара, °С.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации перегретого пара используется параметр перегрева $\xi = c_{pR}(t_R - t_s)/h_{fg}$ [7, 8]. В [7] он применяется в составе поправочного коэффициента к теплоотдаче насыщенного пара

$$\alpha \approx \alpha_0 \left(\frac{1 + \xi}{1 - \beta} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где α_0 – коэффициент теплоотдачи насыщенного пара, Вт/(м²·°С); $\beta \approx q_2/q$ – полнота конденсации; q – плотность теплового потока сконденсировавшегося пара, Вт/м²; q_2 – то же, подводимого к пленке конденсата от не сконденсировавшегося пара, Вт/м²; при полной конденсации $\beta = 0$.

Выражение для расчета коэффициента теплоотдачи при полной конденсации имеет вид [8]

$$\alpha = \alpha_0 (1 + \xi)^{0,25}. \quad (2)$$

Таким образом, рекомендации по учету перегрева при полной конденсации пара путем введения поправки $(1 + \xi)^n$ к коэффициенту теплоотдачи отличаются численными значениями показателя степени n [7, 8].

Недостатком рассмотренных подходов при расчете конденсаторов перегретого пара тепловых насосов систем теплоснабжения является ограничение по температуре нагреваемой воды, которая не может быть выше температуры насыщения. На рис. 1 показан характер действительного изменения температур хладагента и нагреваемой воды по длине L поверхности теплообмена конденсатора при противоточной или перекрестно-противоточной схеме их течения.

При изменении температуры хладагента и нагреваемой воды от t_{x1} и t_{b1} на входе аппарата до t_{x2} и t_{b2} на выходе возможен подогрев воды до температуры t_{b2} , превышающей температуру насыщения t_s . Поэтому целесообразно

разно проводить расчет конденсатора, выделяя зоны охлаждения перегретого пара и собственно конденсации.

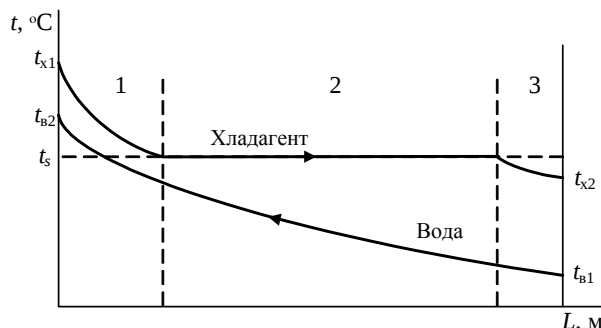


Рис. 1. Распределение температур хладагента и воды в конденсаторе при противотоке:

1 – охлаждение перегретого пара; 2 – конденсация; 3 – охлаждение конденсата

Fig. 1. Temperature distribution of refrigerant and water in the condenser under counterflow conditions: 1 – superheated vapor cooling; 2 – condensation; 3 – condensate cooling

На основе численного исследования [9] и проведенного эксперимента [10] установлено, что использование в схеме теплового насоса охладителя перегретого пара рабочего вещества позволяет получить теплоноситель на выходе из конденсатора с уровнем температуры больше температуры насыщения [9, 10].

В [11, 12] на основе термодинамического анализа работы компрессионного теплового насоса показано, что один из способов повышения эффективности – применение охладителя перегретого пара рабочего тела, устанавливаемого отдельно от конденсатора, что позволяет иметь теплоноситель различных температурных уровней. Можно получить некоторое количество теплоты при более высокой температуре за счет использования перегрева рабочего вещества, выходящего из компрессора. В отопительном тепловом насосе эту теплоту направляют для дополнительного подогрева воды при горячем водоснабжении.

Предложены схемные решения для реализации двухступенчатого нагрева теплоносителя в тепловом насосе [13–16], однако поскольку они не подкреплены количественными данными, нельзя судить об эффективности дополнительного использования охладителя перегретого пара (форконденсатора).

Таким образом, рассмотренные методы анализа конденсаторов тепловых насосов для подогрева воды систем теплоснабжения не дают конкретных данных о параметрах нагреваемого теплоносителя при конденсации перегретого пара. Имеются различные подходы к определению коэффициента теплоотдачи при конденсации перегретого пара. Например, не рассматриваются вопросы влияния количественного значения поправок к коэффициенту теплоотдачи, расхода подогреваемой воды на ее выходную температуру и площадь теплообмена аппарата. Настоящая работа посвящена рассмотрению этих вопросов.

Основная часть

В статье проведен сравнительный анализ двух интегральных методов теплового расчета конденсатора теплового насоса. В первом случае охла-

ждение перегретого пара и конденсация осуществляются в аппарате как единый процесс с использованием поправочного коэффициента перегрева. Второй подход основан на разделении поверхности теплообмена на два участка – охлаждения перегретого пара и собственно конденсации. На каждом из них теплообмен описывается отдельной системой уравнений теплопередачи и теплового баланса. При этом приближенно принимается, что вначале перегретый пар охлаждается до температуры насыщения, а затем конденсируется насыщенный пар. Хотя возможны случаи, когда конденсация перегретого пара начинается раньше достижения температуры насыщения [7, 17], однако их анализ требует отдельного рассмотрения на основе локальной модели конденсации.

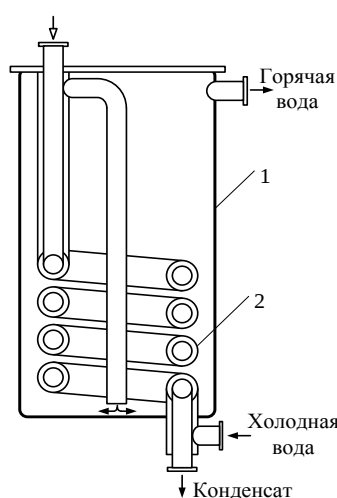


Рис. 2. Конструкция конденсатора-аккумулятора: 1 – корпус; 2 – змеевик труба в трубе

Fig. 2. Design of the condenser-accumulator: 1 – casing; 2 – coil pipe in the pipe

Объект исследования – конденсатор низкотемпературной теплонасосной системы отопления и горячего водоснабжения с перспективным хладагентом R410a номинальной теплопроизводительностью 10 кВт, выполняющий одновременно функцию буферной емкости (рис. 2) [18]. В конденсаторе реализуется полная конденсация перегретого пара.

Аппарат выполнен в виде теплоизолированного бака объемом 500 л с внутренним диаметром емкости 0,75 м. Поверхность теплообмена конденсатора представлена спиральным змеевиком труба в трубе, погруженным в нагреваемую жидкость. Размеры внутренней трубы $d \times \delta = 14 \times 1$ мм, наружной $D \times \Delta = 20 \times 1$ мм. Диаметр змеевика 0,5 м. Во внутреннюю трубу змеевика поступает перегретый пар хладагента с температурой 105,3 °С, давлением 3,4 МПа, его расход 0,0346 кг/с. Температура нагреваемой воды на входе в кольцевой канал 10 °С.

Холодная вода подается снизу, конденсируемый пар – сверху, что соответствует перекрестно-противоточной схеме движения теплоносителей. Искомые параметры – температура воды на выходе конденсатора и площадь поверхности теплообмена.

Результаты численного анализа получены на основе сравнения указанных выше подходов к расчету конденсатора перегретого пара хладагента: в целом (однозонная модель) и по двум участкам (двухзонная модель).

При расчете конденсатора по участкам конденсации и охлаждения перегретого пара тепловой поток и поверхность теплообмена конденсатора находят по правилу аддитивности [19]:

$$Q = Q_1 + Q_2; \quad (3)$$

$$F = F_1 + F_2,$$

где Q_1, Q_2 – тепловой поток на участках конденсации и охлаждения перегретого пара хладагента, Вт; F_1, F_2 – площадь поверхности теплообмена на тех же участках, м².

При расчете конденсатора с использованием коэффициента перегрева $(1 + \xi)^n$ тепловой поток и площадь поверхности теплообмена берутся как одно целое. В обоих анализируемых подходах решается система уравнений теплового баланса и теплопередачи [19], дополняемая замыкающими соотношениями для определения коэффициентов теплоотдачи.

В общем случае процесс описывается уравнениями:

$$Q = G_R [h_{fg} + c_{pR} (t_R - t_s)]; \quad (4a)$$

$$Q = G_B c_{pB} (t_{B2} - t_{B1}); \quad (4b)$$

$$Q = k \Delta \bar{t} F, \quad (4c)$$

где G_R , G_B – массовый расход хладагента и воды, кг/с; c_{pB} – теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); t_{B1} , t_{B2} – температура воды на входе и выходе участков конденсации и охлаждения или конденсатора в целом, °C; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C); $\Delta \bar{t}$ – среднелогарифмический температурный напор, °C.

Система уравнений (4) решается для конденсатора в целом с тепловым потоком Q или отдельно для участков конденсации и охлаждения перегретого пара хладагента для соответствующих тепловых потоков Q_1 , Q_2 и дополняется расчетом коэффициентов теплоотдачи, входящих в уравнение теплопередачи (4c).

Для расчета коэффициента теплоотдачи со стороны конденсирующегося потока хладагента для рассматриваемой конструкции конденсатора использована зависимость для горизонтальных труб [20], которая показывает удовлетворительную корреляцию при конденсации хладагента R410a [21]:

$$Nu_{ж} = 0,05 Re_e^{0,8} Pr_{ж}^{0,33}, \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; в индексах: ж – жидкость; e – эквивалентный;

$$Re_e = Re_{п} \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}} \right)^{0,8} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{п}} \right) + Re_{ж}, \quad (6)$$

где ρ – плотность, кг/м³; μ – динамическая вязкость, Па·с; в индексе п – пар.

Для расчета коэффициентов теплоотдачи со стороны охлаждаемого потока перегретого пара хладагента и для нагреваемой воды используются общие базовые уравнения подобия, отличающиеся значением эквивалентного гидравлического диаметра d_{Γ} . При охлаждении потока пара характерным размером d_{Γ} является внутренний диаметр трубы $d_{\Gamma} = d_{в} = d - 2\delta$, а при нагреве воды – удвоенная толщина кольцевого зазора $d_{\Gamma} = D - 2\Delta - d$.

Для расчета коэффициентов теплоотдачи использовали уравнения для следующих режимов течения потоков:

- турбулентного [22]

$$Nu = \frac{0,023 Re^{0,8} Pr}{1 + 2,14 Re^{-0,1} (Pr^{0,7} - 1)}; \quad (7)$$

- переходного [23]

$$Nu = 0,037(Re^{0,75} - 180)Pr_b^{0,42} \left(1 + \left(\frac{d_r}{L} \right)^{2/3} \right), \quad (8)$$

где L – длина канала, м;

- ламинарного [23]

$$Nu = 3,65 + \frac{0,19(Pr_b d_r/L)^{0,8}}{1 + 0,117(Pr_b d_r/L)^{0,467}}, \quad (9)$$

где $Pr = RePr$ – число Пекле.

Коэффициент теплоотдачи со стороны нагреваемой воды в кольцевом канале с адиабатной внешней поверхностью для рассматриваемой конструкции конденсатора рассчитывается с учетом поправочного коэффициента [24]

$$\alpha_b = \alpha_{bo} \left(1 - \frac{0,45}{2,4 + Pr} \right) \left(\frac{D_b}{d} \right)^{\frac{0,16}{Pr_b^{0,15}}} \varepsilon, \quad (10)$$

где α_{bo} – коэффициент теплоотдачи, определяемый в зависимости от режима течения потока по (7)–(9), Вт/(м²·°C); $D_b = D - 2\Delta$ – внутренний диаметр наружной трубы змеевика труба в трубе, м; d – наружный диаметр трубы с хладагентом, м; ε – поправочный коэффициент ($\varepsilon = 1$ при $d/D > 0,2$); в индексе b – вода.

Результаты теплового расчета исследуемого конденсатора в номинальном режиме, полученные с использованием одно- и двухзонной моделей, приведены в табл. 1. Физические свойства сред определялись по значениям средних температур на рассматриваемых участках. В однозонной модели в поправке $(1 + \xi)^n$ к коэффициенту теплоотдачи при конденсации потока хладагента принимался показатель степени $n = 0,5$ в соответствии с рекомендацией [7].

Из табл. 1 видно, что температура подогретой воды на выходе конденсатора в пределах точности расчета в обоих случаях имеет практически одно значение (49,8 и 49,9 °C) для двухзонного и однозонного конденсаторов соответственно. Это следует из уравнения теплового баланса аппарата для заданных теплового потока, расхода и температуры воды на входе в аппарат.

В то же время из табл. 1 и рис. 3 видно, что поверхность теплообмена конденсатора, которая пропорциональна длине змеевика, и параметры, влияющие на ее размеры, – коэффициенты теплопередачи и температурные напоры отличаются.

Площадь поверхности теплообмена при расчете по двухзонной модели меньше на 20 %, чем по однозонной. Это отличие вызвано разными значениями температурных напоров и коэффициентов теплопередачи (рис. 3). Значение интегрального температурного напора при использовании однозонной модели в 1,65 раза меньше по сравнению с участком охлаждения и в 1,46 раза меньше по сравнению с участком конденсации. Температур-

ный напор в однозонной модели ограничен температурой насыщения на входе и выходе конденсатора. В двухзонной модели локальные температурные напоры на входе и выходе рассматриваемых участков выше, что является причиной повышения на них среднелогарифмических температурных напоров.

Таблица 1

Результаты теплового расчета конденсатора
($Q = 10 \text{ кВт}$, $G_R = 0,0346 \text{ кг/с}$, $G_v = 0,06 \text{ кг/с}$)

Results of thermal calculation of the condenser
($Q = 10 \text{ kW}$, $G_R = 0,0346 \text{ kg/s}$, $G_v = 0,06 \text{ kg/s}$)

Параметр	Двухзонный конденсатор		Однозонный конденсатор
	зона охлаждения перегретого пара	зона конденсации насыщенного пара	
Тепловой поток, Вт	2284	7712	10000
Длина змеевика, м	2,05	5,80	9,74
Хладагент			
Температура на входе/выходе, °C	105,3/55	55/55	105,3/55
Число Рейнольдса	208471	48432	48432
Параметр перегрева	–	–	0,296
Коэффициент перегрева	–	–	1,138
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·°C)	1341	2762	3143
Вода			
Температура на входе/выходе, °C	40,7/49,8	10/40,7	10/49,9
Скорость, м/с	0,60	0,60	0,60
Число Рейнольдса	3989	2676	2988
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·°C)	3247	2770	2533

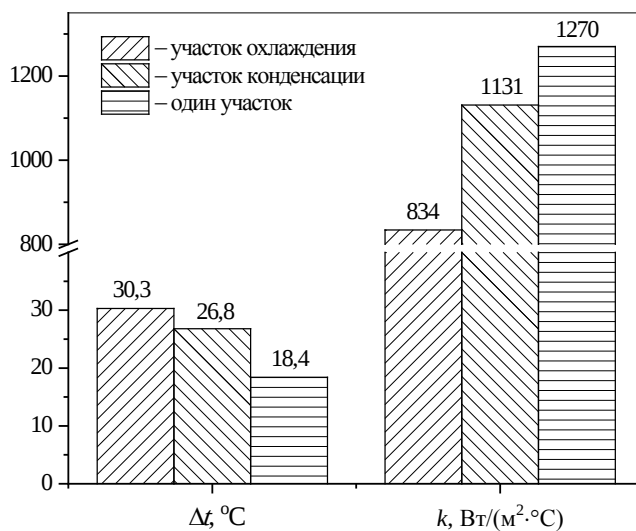


Рис. 3. Изменение температурного напора Δt и коэффициента теплопередачи k на участках конденсатора

Fig. 3. Change in temperature pressure Δt and heat transfer coefficient k in the condenser areas

Коэффициент теплопередачи в однозонной модели соответственно в 1,52 и 1,12 раза выше, чем на указанных участках (рис. 3). На участке охлаждения теплоотдача пара хладагента является определяющей, что закономерно, и приводит к понижению коэффициента теплопередачи до 834 Вт/(м²·°C). На участке конденсации, где коэффициенты теплоотдачи сравнимы, коэффициент теплопередачи 1131 Вт/(м²·°C). Уменьшение коэффициента теплоотдачи воды до 2770 Вт/(м²·°C) на участке конденсации по сравнению с участком охлаждения пара, где он равен 3247 Вт/(м²·°C), вызвано в основном изменением вязкости воды, которая растет с понижением температуры потока (табл. 1).

В итоге различие температурных напоров и коэффициентов теплопередачи в одно- и двухзонной моделях приводит к увеличению поверхности теплообмена при использовании однозонной модели в 1,24 раза из-за неадекватности расчетной модели процесса конденсации перегретого пара.

Дополнительно рассмотрим влияние величины поправки к коэффициенту теплоотдачи (2) на параметры однозонного конденсатора [7, 8]. Возьмем диапазон изменения показателя степени n от 0 до 1 (рис. 4).

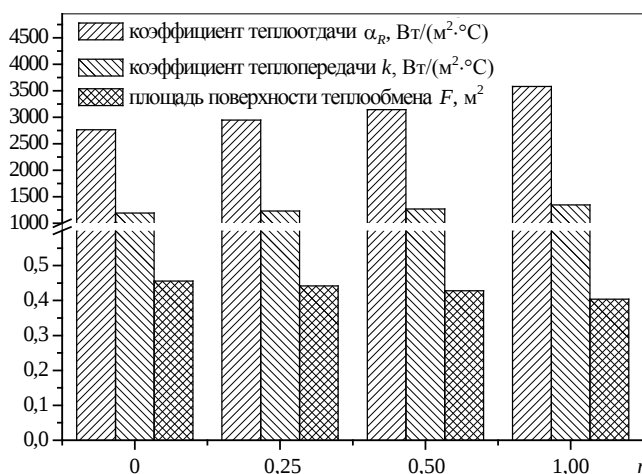


Рис. 4. Влияние показателя степени n поправки к коэффициенту теплоотдачи на параметры однозонного конденсатора перегретого пара

Fig. 4. Influence of the index of the degree n of the correction of the heat transfer coefficient on the parameters of a single-zone superheated steam condenser

Влияние этого параметра на коэффициент теплопередачи k , а соответственно и на площадь поверхности теплообмена F существенно меньше, чем на значение коэффициента теплоотдачи α_R со стороны конденсирующегося потока пара. Например, при $n = 0,5$ по сравнению со случаем, когда поправка не учитывается, коэффициент теплоотдачи увеличился в 1,14 раза, а коэффициент теплопередачи – в 1,07 раза. Площадь поверхности теплообмена уменьшилась в 1,07 раза, она изменяется обратно пропорционально коэффициенту теплопередачи. При $n = 1,0$ коэффициент теплоотдачи увеличился в 1,36 раза, коэффициент теплопередачи – в 1,13 раза. С ростом значения n увеличение коэффициента теплопередачи и уменьшение площади поверхности теплообмена замедляется. Это вызвано тем, что с ростом показателя n определяющим является коэффициент теплоот-

дачи нагреваемой воды, который остается постоянным и имеет меньшее значение по сравнению с теплоотдачей конденсирующегося потока хладагента. Из данного анализа следует, что при рассмотрении конденсирующегося потока перегретого пара необходимо учитывать не только собственно процесс конденсации, но и влияние охлаждающей среды. Наибольшим недостатком метода теплового расчета конденсатора с использованием однозонной модели является ограничение на выходную температуру нагреваемой воды, которая должна быть ниже температуры насыщения.

Так как температура нагреваемой воды на выходе конденсатора при постоянном тепловом потоке и температуре на входе (рис. 5, линия 1) зависит от расхода, рассмотрим его влияние на подогрев воды с использованием двухзонной модели конденсатора.

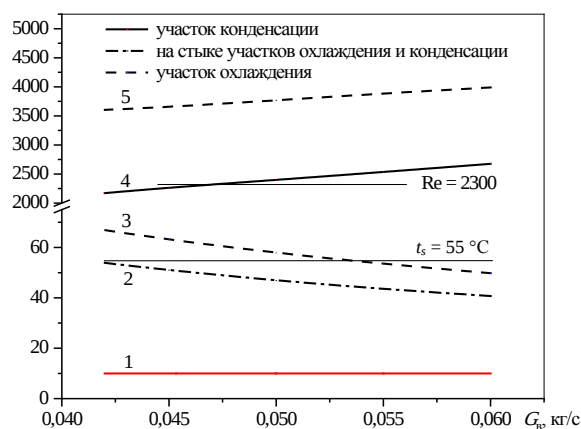


Рис. 5. Изменение параметров воды на участках охлаждения перегретого пара

и конденсации: 1 – температура на входе в конденсатор;

2 – то же на выходе участка конденсации и на входе участка охлаждения пара;

3 – то же на выходе конденсатора; 4, 5 – число Рейнольдса

Fig. 5. Changes in water parameters in the areas of superheated steam cooling and condensation:

1 – water temperature at the entrance to the condenser; 2 – water temperature at the outlet of condensation section and at the entrance to the cooling section of steam;

3 – water temperature at the outlet of the condenser; 4, 5 – Reynolds number

На рис. 5 видно, что при расходе воды меньше 0,054 кг/с температура на выходе конденсатора (линия 3) становится больше температуры насыщения t_s . При этом на участке охлаждения пара (рис. 6, штриховая линия 2) средняя температура стенки выше температуры насыщения. Это подтверждает наличие участка охлаждения перегретого пара. Данный эффект в однозонной модели не учитывается. Для рассматриваемого случая максимальный нагрев воды 66,9 °С при расходе 0,042 кг/с. Число Рейнольдса воды на участках охлаждения и конденсации пара отличается из-за существенного уменьшения вязкости с ростом температуры (рис. 5, линии 4, 5).

Коэффициент теплопередачи на участке охлаждения пара с увеличением расхода от 0,042 до 0,060 кг/с монотонно возрастает в 1,07 раза (рис. 6, штриховая линия 1), а на участке конденсации (рис. 6, сплошная линия 1) повышается приблизительно в два раза из-за смены режима течения потока воды от ламинарного к переходному (рис. 5, линия 4).

Этот фактор приводит к увеличению поверхности теплообмена на участке конденсации при ламинарном течении потока воды (рис. 6, линии 4).

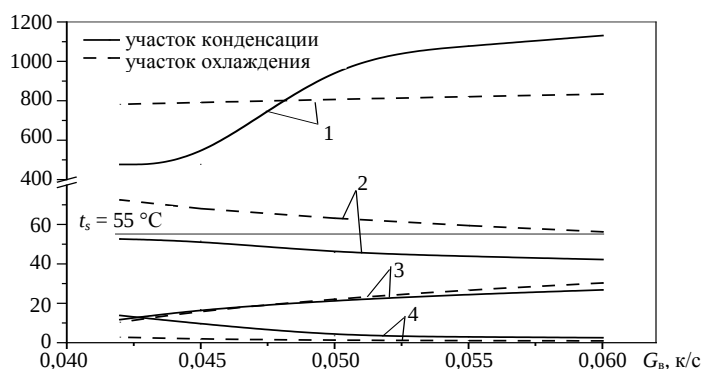


Рис. 6. Изменение параметров конденсатора на участках охлаждения перегретого пара и конденсации: 1 – коэффициент теплопередачи k , Вт/(м²·°C); 2 – температура стенки t_w , °C; 3 – температурный напор Δt , °C; 4 – площадь поверхности теплообмена $F \cdot 10$, м²

Fig. 6. Changes in the parameters of the condenser in the areas of superheated steam cooling and condensation: 1 – heat transfer coefficient k , W/(m²·°C); 2 – wall temperature t_w , °C; 3 – temperature pressure Δt , °C; 4 – heat exchange surface area $F \cdot 10$, м²

Изменение температуры стенки относительно температуры насыщения (рис. 6, линии 2) подтверждает наличие двух участков – охлаждения перегретого пара и его конденсации. На участке охлаждения она выше температуры насыщения, на участке конденсации – ниже.

ВЫВОДЫ

1. Методика однозонного расчета конденсатора теплового насоса с включением теплоты перегрева в теплоту конденсации и использованием коэффициента перегрева имеет ограничение на температуру подогрева нагреваемого теплоносителя воды, не превышающую температуру конденсации при заданном давлении.

2. Методика двухзонного расчета конденсатора перегретого пара с противоточной или перекрестно-противоточной схемой течения рабочих сред и разбиением конденсатора на участки охлаждения перегретого пара и конденсации позволяет получить адекватные результаты по температуре нагреваемой воды, превышающей температуру насыщенного пара хладагента, с учетом расхода нагреваемой воды. Температура стенки на участке охлаждения выше температуры насыщения, а при конденсации – ниже, что подтверждает применимость данной методики.

3. Использование в методике двухзонного расчета конденсатора отдельных усредненных физических свойств рабочих сред на участках охлаждения перегретого пара и конденсации, а также температурных напоров дает более точное значение поверхности теплообмена, которая в рассмотренном случае уменьшается до 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка энергетической эффективности цикла теплового насоса со ступенчатым сжатием / С. К. Абилюдинова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 293–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-293-302>.
2. Петраш, В. Д. Эффективность парокompрессионной трансформации энергетических потоков для теплоснабжения на основе морской воды / В. Д. Петраш, В. О. Макаров, А. А. Хоменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 6. С. 538–553. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-538-553>.

3. The European Heat Pump Market and Statistics Report [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.ehpa.org/market-data/market-report-2021>. Date of access: 13.08.2021.
 4. Михалевич, А. А. Математическое моделирование массо- и теплопереноса при конденсации / А. А. Михалевич. Минск: Наука и техника, 1982. 216 с.
 5. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. М.: Энергия, 1977. 344 с.
 6. Гопин, С. Р. Воздушные конденсаторы малых холодильных машин / С. Р. Гопин, В. М. Шавра. М.: Агропромиздат, 1987. 151 с.
 7. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
 8. Теплопередача в двухфазном потоке / под ред. Д. Баттерворса, Г. Ф. Хьюитта. М.: Энергия, 1980. 328 с.
 9. Володин, В. И. Влияние процессов теплообмена на эффективность компрессионных трансформаторов теплоты / В. И. Володин // Тепломассообмен ММФ-2000: IV Минский междунар. форум: тезисы докладов. Минск, 2000. Т. 10. С. 202–208.
 10. Петраков, Г. Н. Повышение эффективности работы теплового насоса в системах теплоснабжения за счет модернизации конденсатора / Г. Н. Петраков. Воронеж, 2006. 16 с.
 11. Боровков, В. М. Тепловой насос с двухступенчатым конденсатором / В. М. Боровков, А. А. Аль Алавин // Промышленная энергетика. 2007. № 8. С. 40–43.
 12. Боровков, В. М. Энергосберегающие теплонасосные системы теплоснабжения / В. М. Боровков, А. А. Аль Алавин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2007. № 1–2. С. 42–46.
 13. Компрессионная холодильная установка: а. с. SU 1000693 / А. И. Набережных, О. П. Голубев, А. В. Максимов. Оpubл. 28.02.1983.
 14. Тепловой насос: а. с. SU 1359592 / Е. И. Таубман, В. И. Савинкин, Т. С. Антоненко, С. У. Кивензор, И. Э. Гитман. Оpubл. 15.12.1987.
 15. Тепловой насос холодильной установки: а. с. SU 771417 / И. Ф. Городнянский, Р. Л. Данилов, А. Г. Криштафович, Е. М. Лебедько. Оpubл. 15.10.1980.
 16. Тепловой насос: а. с. SU 1204890 / Г. С. Антоненко, В. Р. Данилов, С. У. Кивензор. Оpubл. 15.01.1986.
 17. Hong, S.-J. Discussion on Superheated Steam Condensation and Revaporization [Electronic Resource] / S.-J. Hong, J.-H. Lee // Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting. 2020. Mode of access: <https://journal-home.s3.ap-northeast-2.amazonaws.com/site/kns2020spring/presentation/20S-201.pdf>. Date of access: 13.08.2021.
 18. Володин, В. И. Теплообмен в конденсаторе-аккумуляторе теплового насоса / В. И. Володин, С. В. Здитовецкая // Труды БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. Минск: БГТУ. 2020. № 2 (235). С. 112–116.
 19. Здитовецкая, С. В. Метод расчета пароконденсационных трансформаторов теплоты / С. В. Здитовецкая, В. И. Володин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 5. С. 76–82.
 20. Cavallini, A. Dimensionless Correlation for Heat Transfer in Forced Convection Condensation / A. Cavallini, R. A. Zecchin // International Heat Transfer Conference 5, 1974, 3–7 September, Tokyo, Japan. P. 309–313. <https://doi.org/10.1615/ihct5.1220>.
 21. Condensation Inside Horizontal Tubes: State of the Problem and Analysis of Research Results / V. G. Rifert [et al.] // Transport Phenomena in Two-Phase Flow: Proc. 15 Conf. Sunny Beach, 17–22 Sept. 2011. Sunny Beach, 2011. P. 155–166.
 22. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. Методические указания: РД 24.035.05-89. Л.: НПО ЦКТИ, 1991. 211 с.
 23. Конвективный тепло- и массоперенос / В. Каст [и др.]. М.: Энергия, 1980. 49 с.
 24. Петухов, Б. С. Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев. М.: Атомиздат, 1974. 408 с.
- Поступила 22.02.2022 Подписана в печать 26.04.2022 Опубликована онлайн 31.05.2022

REFERENCES

1. Abildinova S. K., Musabekov R. A., Rasmukhametova A. S., Chicherin S. V. (2019) Evaluation of the Energy Efficiency of the Stage Compression Heat Pump Cycle. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 293–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-293-302> (in Russian).
2. Petrash V. D., Makarov V. O., Khomenko A. A. (2021) The Efficiency of Vapor Compression Transformation of Energy Flows for Heat Supply Based on the Sea Water. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Pro-*

- ceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 64 (6), 538–553. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-538-558> (in Russian).
3. *The European Heat Pump Association Market Report*. Available at: <https://www.ehpa.org/market-data/market-report-2021> (Accessed 13 August 2021).
 4. Mikhalevich A. A. (1982) *Mathematical Modeling of Mass and Heat Transfer during Condensation*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 216 (in Russian).
 5. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. (1977) *Basics of Heat Transfer*. Moscow, Energiya Publ. 344 (in Russian).
 6. Gopin S. R., Shavra V. M. (1987) *Air Condensers of Small Refrigerating Machines*. Moscow, Agropromizdat Publ. 151 (in Russian).
 7. Kutateladze S. S. (1979) *Fundamentals of the Theory of Heat Transfer*. Moscow, Atomizdat Publ. 416 (in Russian).
 8. Butterworth D., Hewitt G. F. (eds.) (1980) *Heat Transfer in a Two-Phase Flow*. Moscow, Energiya Publ. 328 (in Russian).
 9. Volodin V. I. (2000) Influence of Heat Exchange Processes on the Efficiency of Heat Compression Transformers. *Teplomassobmen MMF-2000: IV Minskii Mezhdunar. Forum: Tezisy Dokladov. T. 10* [Heat and Mass Transfer MIF-2000: IV Minsk International Forum: Abstracts of Presentations, Vol. 10]. Minsk. 202–208 (in Russian).
 10. Petrakov G. N. (2016) *Improving the Efficiency of the Heat Pump in Heat Supply Systems by Upgrading the Condenser*. Voronezh. 16 (in Russian).
 11. Borovkov V. M., Al' Alavin A. A. (2007) Heat Pump with Two-Stage Condenser. *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (8), 40–43 (in Russian).
 12. Borovkov V. M., Al' Alavin A. A. (2007) Energy-Saving Heat Pump Systems of Heat Supply. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, (1–2), 42–46 (in Russian).
 13. Naberezhnykh A. I., Golubev O. P., Maksimov A. V. (1983) *Compression Refrigeration Unit*. Author's Certificate SU No 1000693 (in Russian).
 14. Taubman E. I., Savinkin V. I., Antonenko T. S., Kivenzor S. U., Gitman I. E. (1987) *Heat Pump*. Author's Certificate SU No 1359592 (in Russian).
 15. Gorodnyanskii I. F., Danilov R. L., Krishtafovich A. G., Lebed'ko E. M. (1980) *Heat Pump of the Refrigeration Unit*. Author's Certificate SU No 771417 (in Russian).
 16. Antonenko G. S., Danilov V. R., Kivenzor S. U. (1986) *Heat Pump*. Author's Certificate SU No 1204890 (in Russian).
 17. Hong S.-J., Lee J.-H. (2020) Discussion on Superheated Steam Condensation and Revaporization. *Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting*. Available at: <https://journal-home.s3.ap-northeast-2.amazonaws.com/site/kns2020spring/presentation/20S-201.pdf> (Accessed 13 August 2021).
 18. Volodin V. I., Zditovetskaya S. V. (2020) Heat Exchange in a Heat Pump Accumulator Condenser. *Trudy BGTU. Series 2. Khimicheskie Tekhnologii, Biotekhnologii, Geoekologiya = Proceedings of BSTU. Series 2. Chemical Technologies, Biotechnologies, Geoecology*, 2 (235), 112–116 (in Russian).
 19. Zditovetskaya S. V., Volodin V. I. (2012) Calculation Method of Steam Compression Heat Transformers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 76–82 (in Russian).
 20. Cavallini A., Zecchin R. A. (1974) Dimensionless Correlation for Heat Transfer in Forced Convection Condensation. *International Heat Transfer Conference 5, Tokyo, 1974, 3–7 Sept. Tokyo*. 309–313. <https://doi.org/10.1615/ihct5.1220>.
 21. Rifert V. G., Gorin V. V., Barabash P. A., Sereda V. V. (2011) Condensation Inside Horizontal Tubes: State of the Problem and Analysis of Research Results. *Transport Phenomena in Two-Phase Flow: Proceedings of the 15th International Conference, Sunny Beach, 2011, 17–22 Sept. Sunny Beach*. 155–166.
 22. Guidance Document 24.035.05–89. *Thermal and Hydraulic Calculation of Heat-Exchange Equipment of Nuclear Power Plants*. Leningrad, NPO CKTI Publ., 1991. 211 (in Russian).
 23. Kast V., Krischer O., Reinicke N., Wintermantel K. (1974) *Konvektive Wärme- und Stoffübertragung* [Convective Heat and Mass Transfer]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 65. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-52184-3> (in German).
 24. Petukhov B. S., Genin L. G., Kovalev S. A. (1974) *Heat Exchange in Nuclear Power Plants*. Moscow, Atomizdat Publ. 408 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-263-275>

УДК 658.261.621.56

Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел

А. В. Овсянник¹⁾, В. П. Ключинский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Представлено описание разработанной программы, позволяющей моделировать, термодинамически оптимизировать и производить эксергетический анализ более чем ста различных схем тригенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел. С помощью программы произведен эксергетический анализ шести схем тригенерационных турбоустановок на органическом цикле Ренкина: на перегретом паре с парокомпрессионной холодильной установкой; с промежуточным перегревом рабочего тела и парокомпрессионной холодильной установкой; на перегретом паре с холодильной установкой с производством углекислоты; с промежуточным перегревом рабочего тела и холодильной установкой с производством углекислоты; на перегретом паре с холодильной установкой с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой; с промежуточным перегревом рабочего тела, холодильной установкой с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой. В качестве источника энергии для перечисленных схем использована газотурбинная установка. Изучена возможность применения получаемой жидкой углекислоты для охлаждения конденсатора турбоустановки на органическом цикле Ренкина. Проведен сравнительный анализ двух методов получения холода (при помощи парокомпрессионной холодильной установки и холодильной установки с производством углекислоты) для использования в схемах тригенерации. Исследования базировались на методе эксергетического анализа, результаты которого представлены в виде укрупненных диаграмм Грассмана – Шаргута. Проведен технико-экономический анализ применения промежуточного перегрева в органическом цикле Ренкина, в качестве рабочего тела использовался озонобезопасный фреон R245FA. Сформулированы рекомендации по применению исследованных схем тригенерации на органическом цикле Ренкина.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, низкокипящее рабочее тело, производство углекислоты, эксергетический анализ, повышение эффективности, тригенерация, хладагент, охлаждение конденсатора углекислотой, оптимизация, схема тригенерации, диаграмма Грассмана – Шаргута

Для цитирования: Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 263–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-263-275>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.
Sukhoi State Technical
University of Gomel
48, October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-20-36
av.ovsyannik@mail.ru

Trigeneration Turbine Units Based on Low Boiling Working Fluids

A. V. Ovsyannik¹⁾, V. P. Kliuchinski¹⁾

¹⁾Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. A program that allows modeling, thermodynamically optimizing and performing exergetic analysis of more than a hundred different variations of the schemes of trigeneration turbine units based on low-boiling working fluids. With the aid of the program that had been developed, an exergetic analysis of six schemes of trigeneration turbine units on the organic Rankine cycle was performed, viz. on an overheated steam with a steam compression refrigeration unit; with an intermediate overheating of the working fluid and a steam compression refrigeration unit; on an overheated steam with a refrigeration unit with carbon dioxide production; with an intermediate overheating of the working fluid and a refrigeration unit with carbon dioxide production; on an overheated steam with a refrigeration unit with production carbon dioxide and cooling of the turbine condenser with liquid carbon dioxide; with intermediate overheating of the working fluid, a refrigeration unit with carbon dioxide production and cooling of the turbine unit condenser with liquid carbon dioxide. A gas turbine unit was used as an energy source for the above-mentioned schemes. The possibility of using the resulting liquid carbon dioxide to cool the condenser of a turbine unit on an organic Rankine cycle has been studied. A comparative analysis of two methods of obtaining cold (using a steam compression refrigeration unit and a refrigeration unit with carbon dioxide production) for use in trigeneration schemes has been carried out. The research was based on the method of exergetic analysis, the results of which are presented in the form of enlarged Grassmann – Shargut diagrams. A technical and economic analysis of the use of intermediate overheating in the organic Rankine cycle has been carried out, ozone-safe freon R245FA was used as the working fluid. Recommendations for the application of the studied trigeneration schemes on the organic Rankine cycle are formulated.

Keywords: organic Rankine cycle, low-boiling working fluid, carbon dioxide production, exergetic analysis, efficiency improvement, trigeneration, refrigerant, cooling of the condenser with carbon dioxide, optimization, trigeneration scheme, Grassmann – Shargut diagram

For citation: Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2022) Trigeneration Turbine Units Based on Low Boiling Working Fluids. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 263–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-263-275> (in Russian)

Введение

Тригенерация – эффективный способ удовлетворения потребителей электроэнергией, теплотой и холодом, необходимыми в различных отраслях промышленности (для реализации технологических процессов), а также в сфере услуг и жилищно-коммунальном хозяйстве [1]. В определенных условиях тригенерация позволяет снизить затраты топливно-энергетических ресурсов и улучшить экологические показатели генерирующих установок [2].

Для утилизации низкопотенциальных источников энергии (например, тепловых отходов предприятий, выхлопных газов газотурбинной установки (ГТУ), продуктов сжигания биотоплива и других низкопотенциальных топлив) все чаще используются турбоустановки на низкокипящих рабочих телах (НКРТ) [1, 3–18]. В случае когда рабочее тело имеет более низкую, чем у воды, температуру кипения, его испарение происходит при относи-

тельно невысокой температуре, что и позволяет утилизировать низкопотенциальную энергию.

Однако выбор рабочего тела – это сложная и многокритериальная задача [19–21]. Решение Монреальского протокола коренным образом изменило подход к традиционным озоноразрушающим хладагентам, и, начиная с 1990-х гг., на одно из первых мест вышел вопрос об опасности изменения климата и сохранения эмиссии парниковых газов, вызванной применением таких хладагентов. Для анализа экологической целесообразности применения хладагентов используют такие параметры, как озоноразрушающий потенциал (ОРП) и потенциал глобального потепления (парникового эффекта). Для хладагентов группы хлорфторуглеродов $ОРП \geq 1$, гидрохлорфторуглеродов $ОРП < 0,1$, гидрофторуглеродов $ОРП = 0$ [2].

Выделяют группы требований к НКРТ: экологические, термодинамические, эксплуатационные и экономические. Найти хладагенты, отвечающие всем перечисленным критериям, практически невозможно [5]. С термодинамической точки зрения, один из главных показателей при выборе рабочего тела – максимальная удельная работа или максимальный коэффициент полезного действия цикла.

Эксергия – предельное значение энергии, которое может быть полезным образом использовано (получено или затрачено) в термодинамическом процессе с учетом ограничений, накладываемых законами термодинамики. Эксергетический анализ, учитывающий потери от неравновесности процессов в системе, позволяет выполнить как относительную, так и абсолютную оценку степени термодинамического совершенства, применяемых технологий, в отличие от анализа, основанного на энергетическом КПД [6–8].

Проведем эксергетический анализ тригенерационных турбоустановок, использующих низкокипящие рабочие тела. Методика термодинамического анализа турбодетандерных циклов представлена в [6].

Описание и принцип работы программы

Для изучения эксергетической эффективности тригенерационных турбоустановок разработана программа, позволяющая производить эксергетический анализ более чем ста различных вариантов схем с применением различных НКРТ. В качестве источников энергии используются: ГТУ, вторичные энергетические ресурсы и котлоагрегат. Расчет ГТУ производится с учетом допустимой (по техническим соображениям) температуры продуктов сгорания, поступающих в газовую турбину.

Программа позволяет произвести расчет трех различных вариантов турбоустановки на органическом цикле Ренкина (ОЦР): без перегрева, на перегретом паре и с промежуточным перегревом. Оптимальные с эксергетической точки зрения параметры рабочего тела перед турбиной определяются методом равномерного поиска. Также проверяются допустимость

полученных циклов и возможность установки регенеративного теплообменного аппарата на выходе из турбины.

Критерием допустимости ОЦР является степень сухости рабочего тела в процессе расширения в турбине. Полученный цикл не может использоваться, когда степень сухости рабочего тела: перед турбиной ниже допустимой (рис. 1а), в промежуточных ступенях турбины (рис. 1б) или перед последними ступенями (рис. 1с) достигает недопустимых значений. Для определения возможности реализации цикла программа устанавливает степень сухости рабочего тела в различных точках процесса расширения и сравнивает эти значения с допустимыми (например, допустимая степень сухости не должна быть ниже 1). В случае если хотя бы одно из полученных значений не соответствует заданному критерию, цикл выбраковывается и дальнейший его расчет не производится, программа переходит к анализу цикла с другими параметрами.

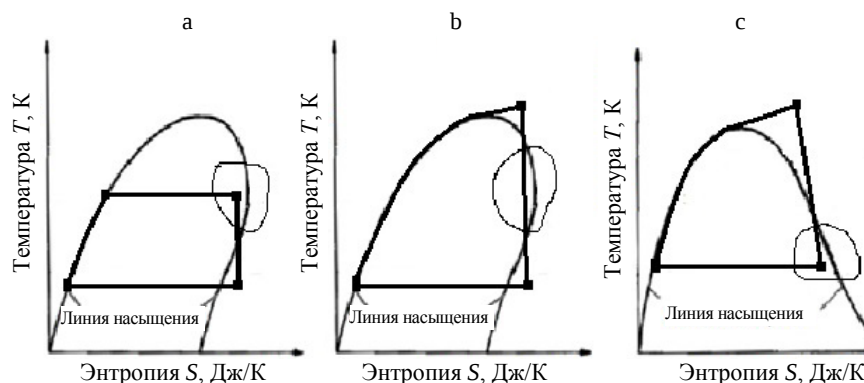


Рис. 1. Случаи недопустимых циклов для турбоустановок на низкокипящих рабочих телах: а – степень сухости рабочего тела достигает недопустимых значений в начале процесса расширения; б – в процессе расширения; с – в конце процесса расширения

Fig. 1. Cases of unacceptable cycles with the use of turbine units on low-boiling working fluids: а – the degree of dryness of the working fluid at the beginning of the expansion process reaches unacceptable values; б – the degree of dryness of the working fluid during the expansion process reaches unacceptable values; с – the degree of dryness of the working fluid at the end of the expansion process reaches unacceptable values

В программе также предусмотрен расчет двух вариантов холодильных установок (ХУ): парокомпрессионной с возможностью переохлаждения рабочего тела и установки для производства жидкой и газообразной углекислоты с возможностью получения холода (рис. 2) [8, 9, 11].

На рис. 2 представлена схема тригенерационной установки с производством углекислоты, включающая: 1 – теплообменный аппарат; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор холодильной установки; 10, 14 – регулирующий вентиль; 11, 15 – сепаратор; 12, 5т – насос; 13, 16 – испаритель; 1то – подогреватель тепловой нагрузки; 1т – котел-утилизатор; 2т – турбину на НКРТ; 3т, 4г – генератор; 4т – конденсатор ОЦР; 6т – реге-

неративный теплообменный аппарат; 1г – компрессор ГТУ; 2г – камеру сгорания ГТУ; 3г – газовую турбину.

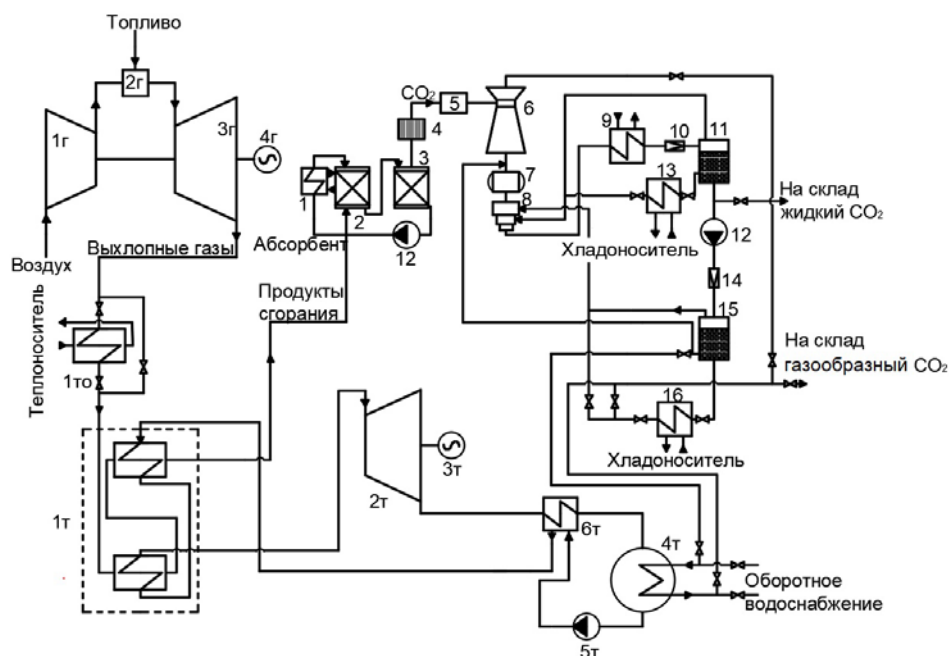


Рис. 2. Схема тригенерационной установки с производством углекислоты

Fig. 2. Diagram of a trigeneration unit with carbon dioxide production

Воздух из атмосферы поступает на всасывание в компрессор, сжимается и подается в камеру сгорания одновременно с топливом. После сгорания горячие газы совершают работу по вращению вала турбины, соединенного с валом генератора. Затем продукты сгорания все еще с довольно высокой температурой попадают в подогреватель тепловой нагрузки, передавая часть своей энергии теплоносителю, и далее – в котел-утилизатор, где и отдают оставшуюся часть энергии НКРТ. Низкокипящее рабочее тело, превратившись в пар в котле-утилизаторе, а при необходимости и пройдя процесс перегрева, поступает в турбину, где совершает работу по вращению ее вала, а затем и связанного с ним вала генератора. Затем НКРТ, будучи все еще в перегретом состоянии, направляется в регенеративный теплообменный аппарат, в котором нагревает сконденсировавшиеся в конденсаторе ОЦР пары НКРТ. Далее насос 5т повышает давление НКРТ, рабочее тело проходит регенеративный теплообменный аппарат и снова поступает в котел-утилизатор. Продукты сгорания попадают в установку абсорбер – десорбер, где отделяется чистый CO_2 . Полученная углекислота при помощи инжектора подается в ресивер. Далее сжатый в компрессоре диоксид углерода подается в конденсатор холодильной установки, охлаждается, дросселируется в регулирующем вентиле и сепарируется в сепараторе. Часть жидкой углекислоты отправляется на склад, оставшаяся поступает на вторую ступень дросселирования 14 и сепарируется в сепараторе 15.

Жидкая углекислота частично используется для получения холода (тригенерация энергии) в испарителях и конденсации рабочего тела в конденсаторе ОЦР. Это приводит к повышению энергетической эффективности установки.

Результаты выводятся двумя способами: графическим – в виде схем, на которых представлены необходимые параметры, и текстовым – в виде текстового файла (отчета), создаваемого программой в зависимости от выбранного варианта схемы.

Результаты исследований

При помощи разработанной программы произведен эксергетический анализ следующих схем тригенерации с: подогревателем теплоносителя, турбоустановкой на перегретом паре, парокомпрессионной холодильной установкой (рис. 3); подогревателем тепловой нагрузки, промежуточным перегревом рабочего тела в турбоустановке и парокомпрессионной холодильной установкой (рис. 4); подогревателем тепловой нагрузки, турбоустановкой на перегретом паре, холодильной установкой с производством углекислоты (рис. 5); подогревателем тепловой нагрузки, промежуточным перегревом рабочего тела в турбоустановке и холодильной установкой с производством углекислоты (рис. 6); подогревателем тепловой нагрузки, турбоустановкой на перегретом паре, холодильной установкой с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой (рис. 7); подогревателем тепловой нагрузки, промежуточным перегревом рабочего тела в турбоустановке, холодильной установкой с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой (рис. 8).

Источник энергии для всех исследуемых вариантов схем – газотурбинная установка. В качестве рабочего тела ОЦР принят фреон R245FA – один из наиболее термодинамически эффективных озонобезопасных НКРТ [10]. Для удобства сравнения циклов рабочим телом для холодильной установки с производством углекислоты и парокомпрессионной холодильной установки выбран R744 (углекислота). Исходные данные и необходимые термодинамические параметры циклов приведены в табл. 1.

Результаты эксергетического анализа представлены на рис. 3–8 в виде укрупненных диаграмм Грассмана – Шаргута [20–24]. Используются следующие сокращения: П – подогреватель тепловой нагрузки; ХУ – холодильная установка; ТУ – турбоустановка; ГТУ – газотурбинная установка. Все параметры на диаграммах указаны в процентах, в качестве ста процентов принята эксергия топлива, поступающего в камеру сгорания газотурбинной установки, а эксергия воздуха, забираемого из окружающей среды с температурой 15 °С, принята за точку отсчета. Тогда эксергия воздуха, обладающего параметрами окружающей среды (температура, давление, концентрация и т. д.), будет равна нулю.

Таблица 1

Исходные данные и термодинамические параметры исследуемых циклов

Initial data and thermodynamic parameters of the cycles under study

Газотурбинная установка	
Степень повышения давления, ед.	14,6
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	33500
Допустимая температура на входе в газовую турбину, °С	1100
Температура выхлопных газов, °С	550
Подогреватель теплоносителя	
График работы теплосети, °С	110/70
Органический цикл Ренкина	
Температура дымовых газов на входе в котел-утилизатор, °С	437
Максимально допустимая температура низкокипящего рабочего тела перед турбиной, °С	250
Максимально допустимая температура низкокипящего рабочего тела промежуточного перегрева, °С	250
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора, °С	25
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора в случае использования для его охлаждения жидкой углекислоты, °С	4
Парокомпрессионная холодильная установка и установка по производству углекислоты и холода	
Получаемая температура холода, °С	2
Температура окружающей среды, °С	15
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора, °С	22
Примечание. Давление рабочего тела перед турбиной и в промежуточном перегревателе определяется программой автоматически как термодинамически оптимальное для данного цикла [21]. Например, для рис. 3 оптимальное давление 5,89 МПа.	

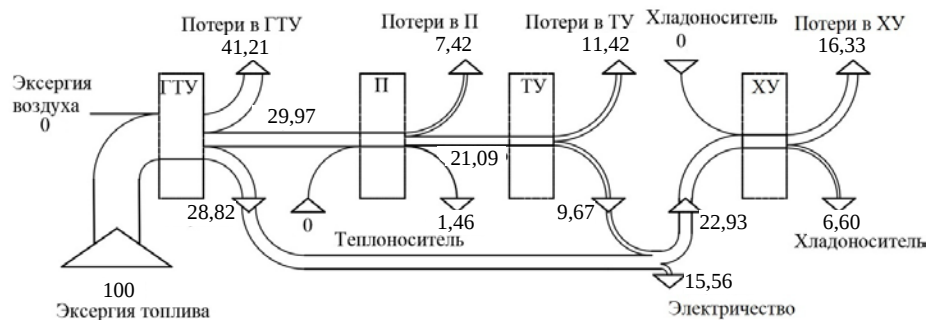


Рис. 3. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки на перегретом паре с парокомпрессионной холодильной установкой

Fig. 3. Grassmann – Sargut diagram of a trigeneration unit on superheated steam with a vapor compression refrigeration unit

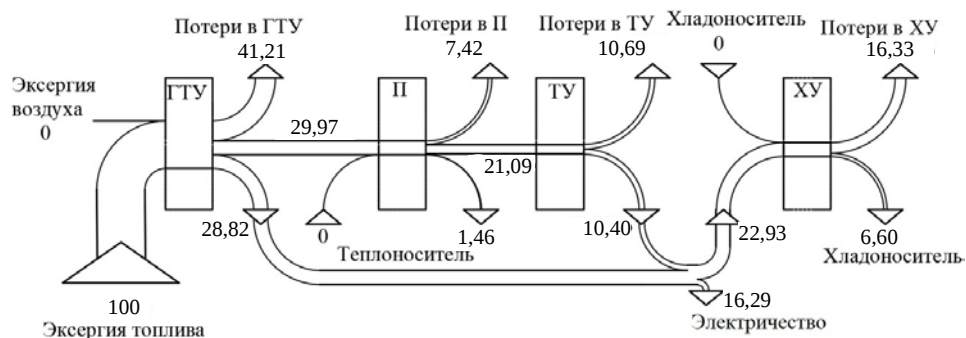


Рис. 4. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки с промежуточным перегревом и парокомпрессионной холодильной установкой

Fig. 4. Grassmann – Shargut diagram of a trigeneration unit with intermediate superheating and a steam compression refrigeration unit

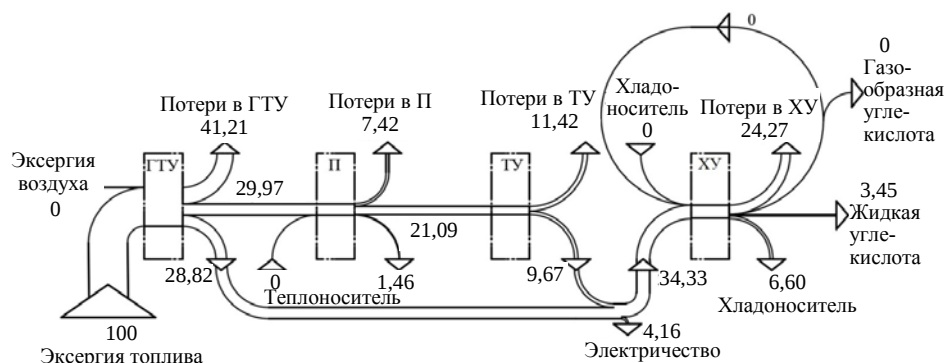


Рис. 5. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки на перегретом паре с установкой по производству углекислоты

Fig. 5. Grassmann – Shargut diagram of trigeneration unit on superheated steam with a carbon dioxide production unit

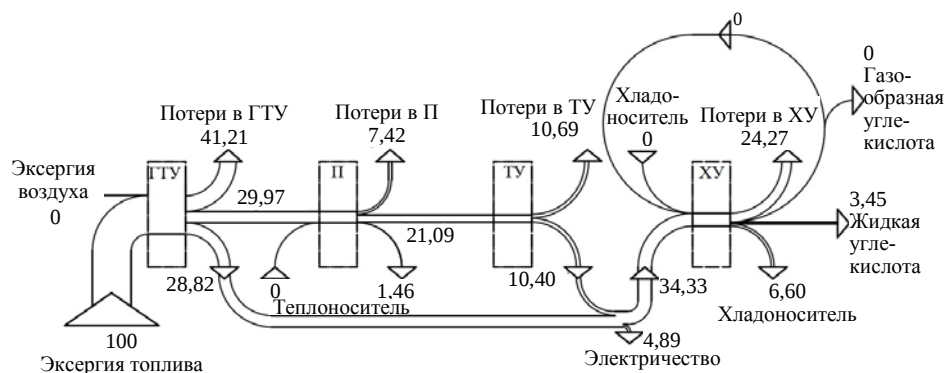


Рис. 6. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки с промежуточным перегревом и установкой по производству углекислоты

Fig. 6. Grassmann – Shargut diagram of a trigeneration unit with intermediate superheating and a carbon dioxide production unit

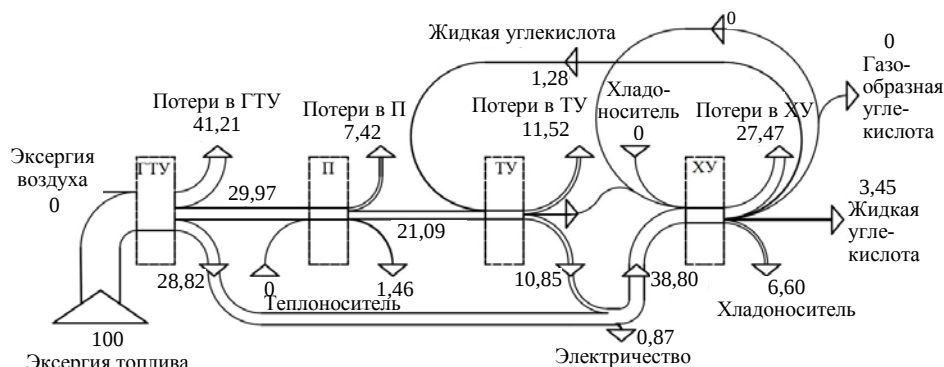


Рис. 7. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки на перегретом паре с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой

Fig. 7. Grassmann – Shargut diagram of a trigeneration unit on superheated steam with carbon dioxide production and cooling of the turbine unit condenser with liquid carbon dioxide

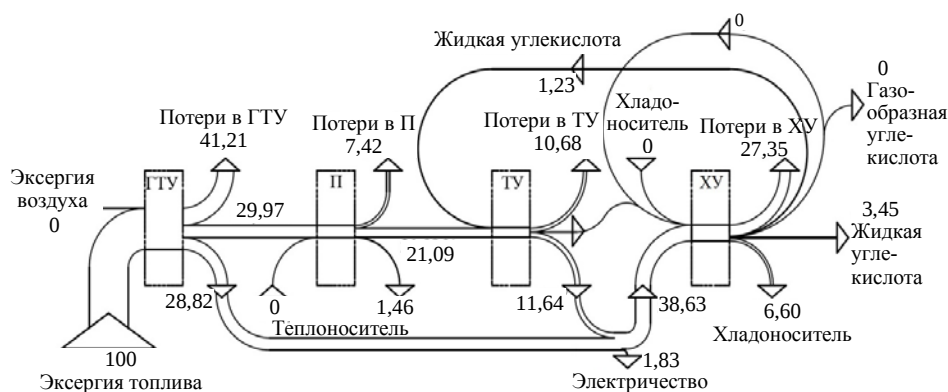


Рис. 8. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки с промежуточным перегревом, производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой

Fig. 8. Grassmann – Shargut diagram of a trigeneration unit with intermediate superheating, carbon dioxide production, and cooling of the turbine unit condenser with liquid carbon dioxide

Промежуточный перегрев рабочего тела во всех исследуемых вариантах (рис. 3–8) более эффективен по сравнению с турбоустановкой на перегретом паре. Это связано со снижением потерь эксергии в ОЦР. Технико-экономические показатели двух вариантов турбоустановки (на перегретом паре и с промежуточным перегревом) (табл. 2) также свидетельствуют об экономической целесообразности применения схем с промежуточным перегревом.

Тригенерационная турбоустановка с производством углекислоты обладает несколько меньшим эксергетическим КПД, чем с парокompрессионной холодильной машиной. Однако она имеет дополнительный эксергетический эффект в виде производимой жидкой и газообразной углекислоты, что не учитывалось в расчетах.

Таблица 2

**Технико-экономические показатели турбоустановки на перегретом паре
и с промежуточным перегревом****Technical and economic indicators of turbo units on superheated steam
and with intermediate overheating**

Параметр	Турбоустановка		Примечание
	на перегретом паре	с промежуточным перегревом	
Количество теплоты Q , поступающей в котел-утилизатор, ГДж	17,90	17,90	Исх. данные
Рабочее тело	R245FA	R245FA	
Температура низкокипящего рабочего тела перед частью высокого давления, °C	250	250	Исх. данные
Давление низкокипящего рабочего тела перед частью высокого давления, МПа	5,90	7,70	Программа*
Температура низкокипящего рабочего тела перед частью низкого давления, °C	–	250	Программа*
Давление низкокипящего рабочего тела перед частью низкого давления, МПа	–	1,80	Программа*
КПД η , %	22,80	24,50	Программа*
Вырабатываемая электроэнергия N , кВт	1133	1216	$N = Q/0,36\mu$
Стоимость установки C_y , $\times 10^6$ руб.	7,02	7,49	[25, 26]
Стоимость электроэнергии C_z , $\times 10^{-2}$ руб./кВт·ч	28,70	28,70	Исх. данные
Экономия ΔC , $\times 10^6$ руб./г.	2,28	2,44	$\Delta C = NC_z$
Чистая прибыль за 10 лет эксплуатации Π , $\times 10^6$ руб.	15,78	16,91	$\Pi = 10\Delta C - C_y$
Программа* – данные получены авторами.			

Охлаждение конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой приводит к увеличению вырабатываемой электрической энергии в ОЦР. Это связано со снижением параметров рабочего тела на выходе из турбины и, как следствие, с увеличением располагаемого теплосоперпада. При этом затраты эксергии на производство углекислоты увеличиваются, превосходя положительный эффект. Но это позволяет предотвратить выброс углекислоты в окружающую среду и отказаться от внешнего источника охлаждения (системы обратного водоснабжения и т. д.).

ВЫВОДЫ

1. Использование в тригенерации схемы с производством жидкой и газообразной углекислоты увеличивает затраты эксергии на привод компрессора, но при этом появляется дополнительный продукт генерации – углекислота. Таким образом, данные схемы (с производством углекислоты) могут быть целесообразны для потребителей, нуждающихся в углекислоте (целлюлозно-бумажные комбинаты, фармацевтические предприятия, предприятия пищевой и химической промышленности и др.).

2. Охлаждение конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой позволяет предотвратить выброс последней в окружающую среду и отказаться от внешнего источника охлаждения (системы оборотного водоснабжения), однако это приводит к снижению эксергетической эффективности тригенерационной установки в целом.

3. Промежуточный перегрев рабочего тела в органическом цикле Ренкина имеет смысл применять вне зависимости от схемы тригенерации. Полученные результаты свидетельствуют не только о термодинамической эффективности схем с промежуточным перегревом, но и об их экономической целесообразности (чистая прибыль увеличивается на 7,2 %).

ЛИТЕРАТУРА

1. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 36–43. <https://doi.org/10.1134/S0040363616060047>.
2. Генерация холода с применением детандер-генераторных агрегатов / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 37–44. <https://doi.org/10.1134/S0040363616050039>.
3. Кокорин, О. Я. Преимущества автономных станций для совместной выработки электроэнергии, тепла и холода / О. Я. Кокорин // Холодильная техника. 2003. № 12. С. 3–6.
4. Системы кондиционирования воздуха, отопления и вентиляции с энергоснабжением от собственного источника / О. Я. Кокорин [и др.] // Холодильная техника. 2001. № 8. С. 11–12.
5. Кокорин, О. Я. Энергетические и экономические преимущества объединения автономных источников теплоснабжения зданий с источниками холодоснабжения систем кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин // Холодильная техника. 2003. № 1. С. 6–9.
6. Роль искусственного охлаждения в мировой экономике / Д. Коломб [и др.] // Холодильная техника. 2016. № 1. С. 4–11.
7. Кудрин, Б. И. Новые тенденции в тригенерационных технологиях [Электронный ресурс] / Б. И. Кудрин, В. С. Кожиченков // Энергосовет. 2011. № 4. Режим доступа: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=200.
8. Овсянник, А. В. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2019. № 2. С. 41–51.
9. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкикипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2020. № 3/4. С. 108–115.
10. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкикипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. А. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>.
11. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>.
12. Садыков, Р. А. Применение турбодетандера в паросиловых установках для утилизации тепловой энергии в системах теплоснабжения / Р. А. Садыков [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 56–62. <https://doi.org/10.1134/s0040363616030115>.
13. Optimal Performance Characteristics of Subcritical Simple Irreversible Organic Rankine Cycle / W. Chen [et al.] // Journal of Thermal Science. 2018. Vol. 27, No 6. P. 555–562. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1049-5>.
14. Trigeneration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Unit of Turbo Detainer and Recovery Boiler / A. V. Ovsyannik [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. No 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.

15. Ovsyannik, A. V. Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander / A. V. Ovsyannik, V. P. Kliuchinski // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1683. No 042005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042005>.
16. Овсянник, А. В. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 65–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77>.
17. Гафуров, А. М. Перспективные области применения энергетических установок на низкокипящих рабочих телах / А. М. Гафуров // *Вестник Казан. гос. энергет. ун-та*. 2015. № 1. С. 93–98.
18. Тарасов, С. А. Газотурбинная установка малой мощности с утилизацией теплоты в контуре с низкокипящим рабочим телом / С. А. Тарасов, В. А. Фомин // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2017. Т. 23, № 1. С. 61–68.
19. Белов, Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г. В. Белов, М. А. Дорохова // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 2. С. 99–124.
20. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
21. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 295 с.
22. Сажин, Б. С. Эксергетический анализ работы промышленных установок / Б. С. Сажин, А. П. Булеков, В. Б. Сажин. М.: Моск. гос. текстильн. ун-т им. А. Н. Косыгина, 2000. 297 с.
23. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
24. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 280 с.
25. Organic Rankine Cycle Systems: A Techno-Economic Overview / V. Broek [et al.] // *European Metallurgical Conference*. Weimar, 2013. P. 833–844.
26. Самоявчев, И. С. Оценка экономических показателей проекта применения ОЦР-установок в окрасочных цехах автомобильного производства Горьковского автомобильного завода / И. С. Самоявчев // *Интеллектуальная электротехника*. 2018. № 4. С. 35–42.

Поступила 04.04.2021 Подписана в печать 12.07.2021 Опубликовано онлайн 31.05.2022

REFERENCES

1. Klimenko A. V., Agababov V. S., Il'ina I. P., Rozhnatovskii V. D., Burmakina A. V. (2016) Schemes of Trigeneration Units for Centralized Power Supply. *Thermal Engineering*, 63 (6), 414–421. <https://doi.org/10.1134/s0040601516060045>.
2. Klimenko A. V., Agababov V., Koryagin A., Baidakova Yu. (2016) Refrigeration Using Expander-Generator Units. *Thermal Engineering*, 63 (5), 342–348. <https://doi.org/10.1134/s0040601516050037>.
3. Kokorin O. Ya. (2003) Advantages of Autonomous Stations for Joint Generation of Electricity, Heat and Cold. *Kholodil'naya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (12), 3–6 (in Russian).
4. Kokorin O. Ya., Komissarov V. V., Kronfeld Ya. G., Bazumatov S. V. (2001) Air Conditioning, Heating and Ventilation Systems with Energy Supply from its Own Source. *Kholodil'naya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (8), 11–12 (in Russian).
5. Kokorin O. Ya., Levin I. E. (2003) Energy and Economic Advantages of Combining Autonomous Heat Sources of for Buildings with Sources of Cooling for Air Conditioning Systems. *Kholodil'naya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (1), 6–9 (in Russian).
6. Kolomb D. (2016) The Role of Artificial Cooling in the Global Economy. *Kholodil'naya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (1), 4–11 (in Russian).
7. Kudrin B. I., Kozhichenkov B. I. (2011) New Trends in Trigeneration Technologies. *Energosovet*, (4). Available at: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=200 (in Russian).
8. Ovsyannik A. V., Valchenko N. A., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I. (2019) Trigeneration of Energy in Carbon Dioxide Turbo-Expander Units. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel], (2), 41–51 (in Russian).

9. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Development of a Computer Program for Optimizing the Parameters of a Low-Boiling Working Fluid in a Turbo-Expander Unit. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel], (3–4), 108–115 (in Russian).
10. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Units. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562> (in Russian).
11. Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Unit Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian).
12. Sadykov R. A., Daminov A. Z., Solomin I. N., Futin V. A. (2016) Use of a Turboexpander in Steam Power Units for Heat Energy Recovery in Heat Supply Systems. *Thermal Engineering*, 63 (5), 360–366. <https://doi.org/10.1134/S0040601516030113>.
13. Chen W. J., Feng H. J., Chen L. G., Xia S. J. (2018) Optimal Performance Characteristics of Subcritical Simple Irreversible Organic Rankine Cycle. *Journal of Thermal Science*, 27 (6), 555–562. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1049-5>.
14. Ovsyannik A. V., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I., Kliuchinski V. P. (2020) Trigeneration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Unit of Turbo Detainer and Recovery Boiler. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683, 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.
15. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683, 042005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042005>.
16. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2021) Turbo-Expander Units on Low Boiling Working Fluids. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 65–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77> (in Russian).
17. Gafurov A. M. (2015) Promising Areas of Application of Power Units on Low-Boiling Working Bodies. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta = Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*, (1), 93–98 (in Russian).
18. Tarasov S. A., Fomin V. A. (2017) Gas-Turbine Unit of Small Capacity with Heat Utilization in a Low Boiling Fluid Circuit. *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti SPbGPU = St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology*, 23 (1), 61–68 (in Russian).
19. Belov G. V., Dorokhova M. A. (2014) Renkin's Organic Cycle and its Application in Alternative Power Engineering. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, (2), 99–124 (in Russian).
20. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K.; Ed. by V. M. Brodyanskii (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
21. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energiya Publ. 295 (in Russian).
22. Sazhin B. S., Bulekov A. P., Sazhin V. B. (2000) *Exergetic Analysis of the Work of Industrial Units*. Moscow, A. N. Kosygin Moscow State Textile University. 297 (in Russian).
23. Grigorieva V. A., Zorina V. M. (1988) *Theoretical Foundations of Heat Engineering. Thermal Engineering Experiment*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 560 (in Russian).
24. Szargut Y., Petela R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energiya Publ. 280 (in Russian).
25. Broek V., Quoilin S., Declaye S., Lemort V. (2013) Organic Rankine Cycle Systems: A Techno-Economic Overview. *Proceedings of European Metallurgical Conference*, Weimar, 833–844.
26. Samoyavchev I. S. (2018) Estimation of Economic Indicators of the Project of Application of CRO-Units in the Paint Units of Gorky Automobile Unit. *Intellektual'naya Elektrotehnika = Smart Electrical Engineering*, (4), 35–42 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284>

УДК 627.8.034

Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень

В. В. Ивашечкин¹⁾, П. М. Богославчик¹⁾, В. В. Верменюк¹⁾,
О. В. Немеровец¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Масштабное гидротехническое сооружение, связанное с возведением и эксплуатацией больших плотин и водохранилищ, оказывает влияние на экосистему и физико-географические характеристики района строительства. Помимо этого, в период прохождения катастрофических паводков и половодий возрастает опасность гидродинамической аварии, т. е. переполнения водохранилищ, перелива через гребень земляной плотины и ее разрушения, сопровождаемого образованием прорана и истечением через него в нижний бьеф неустановившегося потока воды в виде волны прорыва. Процесс размыва грунтовой плотины вследствие перелива воды через гребень можно разделить на две стадии. На первой размывается низовой откос, по которому вода движется как по быстротоку. Профиль плотины, вначале трапециевидный, к концу размыва принимает форму, близкую к треугольной, причем отметка гребня со стороны верхового откоса остается постоянной. Вторая стадия характеризуется интенсивным снижением гребня, плотина быстро приобретает форму водослива практического профиля, которая сохраняется до конца размыва. В это же время происходит интенсивное расширение прорана. Как показал анализ, существующие математические модели, используемые для расчета динамики размыва плотины, особенно ее первой стадии до расширения прорана, несовершенны. В статье представлена разработанная авторами уточненная методика моделирования процесса размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень. Производимые по ней расчеты позволяют построить гидрограф расхода в створе размываемой плотины. Методика может применяться при разработке проектной документации на первой стадии проектирования плотин, а также при определении прогнозных количественных и качественных характеристик водного режима водохранилищ.

Ключевые слова: расход, паводок, водохранилище, плотина, размыв, проран, перелив, затопление, гидродинамическая авария, волна прорыва, гребень плотины, моделирование

Для цитирования: Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень / В. В. Ивашечкин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284>

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

Theoretical Foundations for Calculating the Erosion of Soil Dams during Overflow of Water over the Ridge

V. V. Ivashechkin¹⁾, P. M. Bohaslauchyk¹⁾, V. V. Veremenyuk¹⁾, O. V. Nemeravets¹⁾

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

Abstract. Large-scale hydraulic engineering construction associated with the erection and operation of large dams and reservoirs has an impact on the ecosystem and physical and geographical characteristics of the construction area. In addition, during the passage of catastrophic floods and high waters, the danger of a hydrodynamic accident increases, i. e. overflow of reservoirs, overflow of masses over the ridge of an earthen dam and its destruction, accompanied by the formation of a closure channel and the outflow of an unsteady water flow through it into the lower reaches in the form of a breakthrough wave. The process of erosion of an underground dam due to the overflow of water over the ridge can be divided into two stages. During the first one, the lower slope is eroded, along which the water moves as if by a rapid current. The profile of the dam, initially trapezoidal, by the end of the erosion takes a shape close to triangular, and the ridge mark on the side of the upper slope remains constant. The second stage is characterized by an intensive reduction of the ridge; the dam quickly takes the form of a practical profile spillway, which persists until the end of erosion. At the same time, there is an intensive expansion of the closure channel. As the analysis showed, the existing mathematical models used to calculate the dynamics of the erosion of the dam, especially its first stage before the expansion of the closure channel, are not perfect. The article presents a refined methodology developed by the authors for modeling the process of erosion of ground dams during water overflow over the ridge. The calculations made in accordance with this methodology make it possible to construct a flow hydrograph in the location of the eroded dam. The methodology can be used in the development of project documentation at the first stage of dam design, as well as in determining the forecast quantitative and qualitative characteristics of the water regime of reservoirs.

Keywords: discharge, flood, reservoir, dam, erosion, closure channel, overflow, flooding, hydrodynamic accident, breakthrough wave, dam ridge, simulation

For citation: Ivashechkin V. V., Bohaslauchyk P. M., Veremenyuk V. V., Nemeravets O. V. (2022) Theoretical Foundations for Calculating the Erosion of Soil Dams during Overflow of Water over the Ridge. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284> (in Russian)

Введение

Для накопления и хранения воды в целях ее использования в народном хозяйстве постоянно проектируются и создаются новые водохранилища. В Республике Беларусь создано 153 водохранилища с общей площадью зеркала 822 км², полезным объемом 1,2 км³. Сравнительно недавно введены в действие три крупные ГЭС: Гродненская на р. Неман, Витебская и Полоцкая на р. Западная Двина. Подпорные сооружения водохранилищ удерживают огромные массы воды. В экстремальных ситуациях при прохождении по реке катастрофических паводков и половодий возникает риск переполнения водохранилищ, перелива этих масс через гребень земляной плотины и затопления значительных территорий [1–3]. При нормальных условиях эксплуатации возникают проблемы, связанные с разрушением берегов и откосов [4]. Разрушение плотины сопровождается образованием прорана и истечением через него в нижний бьеф неустановившегося потока воды в виде волны прорыва. Волна прорыва и катастрофическое затоп-

ление местности являются основными разрушающими факторами гидродинамических аварий.

Анализ используемых математических моделей для расчета динамики размыва плотины (особенно ее первой стадии до расширения прорана) показал, что они несовершенны и базируются на приближенных зависимостях [5–7]. Цель настоящей статьи – разработка уточненной методики моделирования процесса размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень.

Моделирование процессов разрушения грунтовой плотины

Процесс размыва однородных плотин моделируется в соответствии с методикой, разработанной и описанной в [8]. В нем выделяют две стадии. На первой (рис. 1а) размывается низовой откос, по которому вода движется как по быстротоку. Профиль плотины, вначале трапецеидальный, к концу размыва низовой призмы $ABCD$ принимает форму, близкую к треугольной, причем отметка гребня со стороны верхового откоса остается постоянной. Вторая стадия (рис. 1б) характеризуется интенсивным снижением гребня, плотина быстро приобретает форму водослива практического профиля, которая сохраняется до конца размыва. В это же время происходит интенсивное расширение прорана.

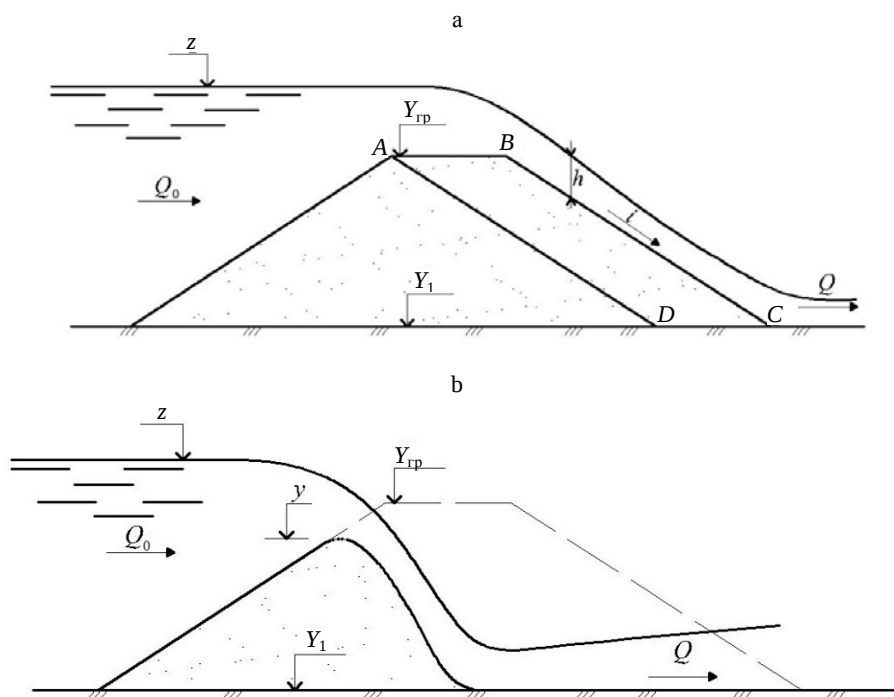


Рис. 1. Схема размыва грунтовой плотины при переливе: а – первая стадия; б – вторая стадия

Fig. 1. Scheme of erosion of a soil dam during overflow: a – first stage; b – second stage

Процесс разрушения грунтовой плотины и возникновения прорана можно описать системой четырех дифференциальных уравнений.

1. Уравнение для описания первой стадии размыва [8]:

$$\frac{dM}{dt} = 0,055 \frac{i^{1,275} (\sigma_n m_1)^{1,45} (2g)^{0,725}}{n_1^{2,55}} B (z - Y_{гр})^{2,175}, \quad (1)$$

где M – масса грунта низовой призмы, кг; t – время, с; i – уклон дна на быстротоке, $i = \sin \alpha_1$; α_1 – угол наклона низового откоса к горизонту; σ_n – коэффициент подтопления ($\sigma_n = 1$, если подтопления нет, $\sigma_n < 1$ в противном случае); m_1 – коэффициент расхода водослива; g – ускорение свободного падения, $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$; n_1 – коэффициент шероховатости поверхности низового откоса, $n_1 = 0,0324d^{1/8}$ при h/r от 1000; h – глубина потока, м; r – радиус частиц размываемого грунта, м (формула Гончарова) [9]; B – ширина прорана, предполагаемая постоянной в течение первого этапа размыва плотины, м; z – отметка уровня верхнего бьефа, м; $Y_{гр}$ – отметка гребня плотины, м.

В случае мелкозернистых грунтов ($d < 1,0 \text{ мм}$) можно сделать допущение [8], что низовой откос, размываясь, остается параллельным самому себе. Учитывая это, преобразуем (1), чтобы получить выражение для ширины части гребня плотины $b(t)$, оставшейся не размытой к моменту времени t . Для этого представим левую часть выражения (1) в виде

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\rho Y_{гр} B d (b_{гр} - b)}{dt}, \quad (2)$$

где ρ – плотность грунта плотины, кг/м³; $b_{гр}$ – начальная ширина гребня плотины, м.

Тогда из (1) и (2) получим

$$\frac{db}{dt} = -0,055 \frac{i^{1,275} (\sigma_n m_1)^{1,45} (2g)^{0,725}}{n_1^{2,55} \rho Y_{гр}} (z - Y_{гр})^{2,175}. \quad (3)$$

2. Уравнение для изменения ширины прорана в зависимости от времени. В работе К. Р. Пономарчука [10] по итогам гидравлического моделирования построены графики изменения во времени ширины прорана $B = B(t)$, на основании которых выведена эмпирическая формула

$$\frac{dB}{dt} = 0,035 \frac{\sqrt{g} h_t^{4,5}}{W_{уд}^2}, \quad (4)$$

где h_t – разность уровней воды между верхним бьефом и дном прорана (действующий напор на проране), м; $W_{уд}$ – площадь поперечного сечения плотины между ее гребнем и дном прорана, м².

Замечаем, что $h_t = z - y$, где y – отметка гребня водослива в пределах прорана (дна прорана), м; площадь сечения $W_{yd} = [b_{гр} + \bar{m}'(Y_{гр} - y)](Y_{гр} - y)$, где $\bar{m}'$ – среднее заложение откосов плотины; $\bar{m}' = \frac{m'_1 h_1 + m'_2 h_2}{h_1 + h_2}$, где m'_1, h_1, m'_2, h_2 – заложения и высоты соответственно верхового и низового откосов. Тогда (4) запишем в виде

$$\frac{dB}{dt} = 0,035 \frac{\sqrt{g}(z-y)^{4,5}}{[b_{гр} + \bar{m}'(Y_{гр} - y)]^2 (Y_{гр} - y)^2}. \quad (5)$$

3. Уравнение для отметки $y(t)$ гребня водослива в пределах прорана (уточнено авторами) [8]:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{B\varepsilon}{\rho g} (\sigma_n m_2)^{0,407} (z-y)^{0,61}, \quad (6)$$

где $\varepsilon = 2g \frac{1-1,26\sqrt[3]{m_2^2}}{\beta}$; m_2 – коэффициент расхода водослива (как правило, отличается от m_1); β – постоянная, зависящая от гранулометрического состава размываемого грунта; параметр B находят по формуле

$$B = 2,224(1+\varphi)d \left(\frac{5,64n_2\sqrt{2g}}{\varphi w} \right)^{3,33} g^{2,165} \alpha^{-1,962},$$

где φ – параметр турбулентности; n_2 – коэффициент шероховатости поверхности прорана; w – гидравлическая крупность частиц размываемого грунта, м/с; α – коэффициент Кориолиса.

4. Уравнение для отметки $z(t)$ верхнего бьефа водохранилища в общем случае имеет вид

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_0 - Q - Q_c - Q_E}{F(z)}, \quad (7)$$

где Q_0 – расход воды, поступающей в верхний бьеф (приточность), м³/с; Q – то же через проран; Q_c – то же в створах водосбросных сооружений; Q_E – то же, используемый для энергетики; $F(z)$ – площадь водной поверхности водохранилища при отметке z верхнего бьефа, которую определяют методом наименьших квадратов по опытным данным для каждого конкретного водохранилища [11, с. 65; 12, с. 150], м².

Расход воды через проран находим как через водослив

$$Q = mB\sqrt{2g}(z-y)^{1,5}. \quad (8)$$

Значения параметров, входящих в дифференциальные уравнения (3), (5)–(7), определяют для каждого изучаемого объекта отдельно. Рассмотрим

алгоритм использования указанных уравнений для моделирования процесса разрушения грунтовой плотины и возникновения прорана. Весь процесс условно разбивают на три этапа.

Первый этап – процесс размыва гребня плотины с его начальной шириной $b_{гр}$. Для его моделирования используем уравнения (3), (7), (8) с начальными условиями $z(0) = Y_{гр}$, $b(0) = b_{гр}$ и коэффициентом расхода $m = m_1$. На всем этапе принимается $y(t) \equiv Y_{гр}$ и $B(t) \equiv B_0$ (для дальнейших вычислений начальная ширина прорана B_0 оказывается несущественной при определении его конечной ширины, поэтому имеет смысл брать ее значение, равное ширине предполагаемого русла в нижнем бьефе). Вычисления производятся на промежутке времени $(0; T_1)$, где T_1 определяется из условия $b(T_1) = 0,01b_{гр}$. Для времени $t < T_1$ уравнения (5), (6) не используются.

Второй этап – процесс интенсивного расширения прорана и размыва его гребня до дна плотины. Здесь используются уравнения (5)–(7). Для (6) начальное условие $y(T_1) = Y_{гр}$. Коэффициент расхода в (8) $m = m_2$. Уравнение (5) начинают использовать при $t > T_1 + \delta$, где δ – заданная малая величина, иначе знаменатель обращается в 0. Вычисления производятся на промежутке времени $(T_1; T_2)$, где T_2 определяется из условия $y(T_2) = 0,01Y_{гр}$. Для времени $t > T_1$ уравнение (3) не используется.

Третий этап – процесс расширения прорана и слив большей части объема водохранилища. Здесь используются уравнения (6), (7). Вычисления производятся на промежутке времени $(T_2; T_3)$, где T_3 определяется из условия $z(T_3) < z_{крит}$; $z_{крит}$ – заданная величина.

Пример расчета. Математическое моделирование разрушения плотины и образования волны прорыва осуществлено по описанной методике на примере Клястицкого водохранилища на р. Нища (Россонский район Витебской области). Плотина насыпная однородная из мелких песков, общая длина 164 м (рис. 2). По гребню проходит эксплуатационная дорога с гравийным покрытием шириной 4,5 м и обочинами по 0,75 м. Заложение верхового откоса плотины 1:3,5; низового: от гребня плотины до бермы – 1:2,5; от бермы до дна 1:3,0.

Данные для плотины: отметка гребня $Y_{гр} = 5,5$ м относительно гребня водосброса; ширина гребня $b_{гр} = 6$ м; диаметр частиц грунта тела плотины $d = 0,5$ мм; среднее заложение откосов $\bar{m}' = 2,75$; плотность грунта тела плотины $\rho = 1600$ кг/м³; гидравлическая крупность $w = 0,05$ м/с; постоянная, зависящая от гранулометрического состава размываемого грунта, $\beta = 2$; коэффициенты расхода для первого этапа $m_1 = 0,35$, для второго и третьего этапов $m_2 = 0,5$; приточность $Q_0 = 174$ м³/с; параметр турбулентности $\varphi = 1$; коэффициент подтопления $\sigma_{п} = 0,6$; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,4$; начальная ширина прорана $B = 10$ м. Для простоты предполагаем, что расход в створах водосбросных сооружений $Q_c = 0$, расход, используемый для энергетики, $Q_E = 0$, что не является существенным ограничением.

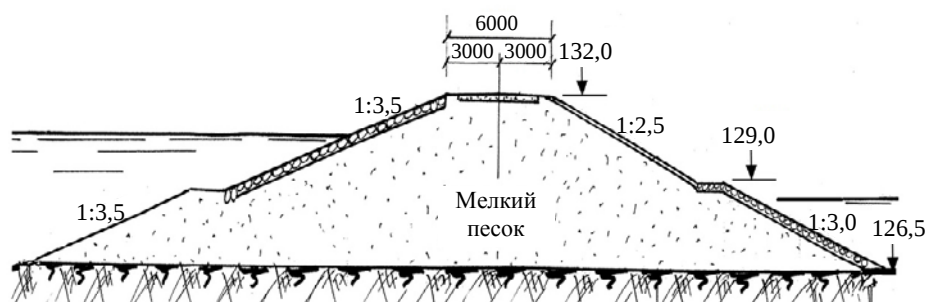


Рис. 2. Поперечный профиль однородной грунтовой плотины на реке Нища

Fig. 2. Cross-section of a homogeneous earth dam on the Nishcha river

Вычисленные данные – коэффициенты шероховатости поверхности: низового откоса (по формуле Гончарова) $n_1 = 0,0125$; прорана $n_2 = n_1$.

Площадь водной поверхности Клястицкого водохранилища в зависимости от отметки уровня верхнего бьефа задана в виде таблицы. После обработки табличных данных методом наименьших квадратов получена эмпирическая формула $F = F(z)$:

$$F = 1,21 + 0,0007e^z - 1,5(0,74)^{e^z}.$$

Результаты моделирования процесса разрушения плотины (с момента окончания первого этапа), полученные с помощью компьютерной программы, представлены в виде кривых изменения во времени: ширины прорана $B = B(t)$, уровня верхнего бьефа $z = z(t)$, удельного расхода воды, проходящей через проран, $Q = Q(t)$ в створе плотины (рис. 3).

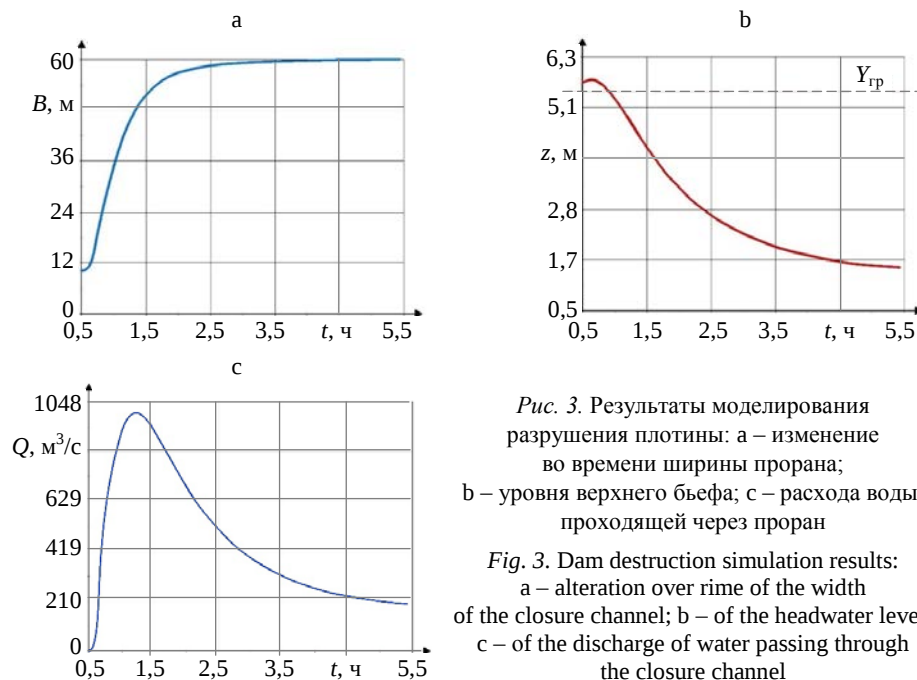


Рис. 3. Результаты моделирования разрушения плотины: а – изменение во времени ширины прорана;

б – уровня верхнего бьефа; с – расхода воды, проходящей через проран

Fig. 3. Dam destruction simulation results: а – alteration over time of the width of the closure channel; б – of the headwater level; с – of the discharge of water passing through the closure channel

Из анализа полученных графиков следует, что процесс размыва низового откоса (первый этап разрушения плотины) занимает приблизительно 30 мин (точнее 0,541 ч), при этом отметка гребня остается постоянной. На протяжении примерно 75 мин происходит интенсивное нарастание расхода параллельно с увеличением ширины прорана, сопровождающееся понижением уровня верхнего бьефа и снижением отметки гребня плотины (второй этап разрушения).

ВЫВОДЫ

1. Методика моделирования разрушения грунтовой плотины разработана на основе решения численным методом системы четырех уравнений, описывающих трехэтапный размыв грунтовой плотины, баланс воды в водохранилище, образование и развитие прорана, что позволило получить гидрограф расхода в створе размываемой плотины. Разработана компьютерная программа. Приведен пример расчета.

2. Решение задачи моделирования разрушения грунтовой плотины позволяет определить граничные и начальные условия в ее створе для скорости и глубины потока в нижнем бьефе, используемых для определения границ затопления территории, расположенной ниже створа гидроузла.

3. Методика может применяться при: разработке проектной документации на первой стадии проектирования плотин и водохранилищ, определении прогнозных количественных и качественных характеристик водного режима при создании водохранилищ, оценке ущерба от разрушения плотины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вереме́нюк, В. В. Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины / В. В. Вереме́нюк, В. В. Ива́шечкин, О. В. Не́меровец // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 6. С. 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567>.
2. Малик, Л. К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений / Л. К. Малик. Проблемы безопасности. М.: Наука, 2005. 354 с.
3. Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений / В. Н. Щедрин [и др.]. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. 283 с.
4. Левкевич, В. Е. (2018) Закономерности развития береговых процессов на водохранилищах гидроэлектростанций Беларуси / В. Е. Левкевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. 463–478. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-463-478>.
5. Карпенчук, И. В. Определение параметров волны прорыва и оценка возможных последствий затопления / И. В. Карпенчук, М. Ю. Стриганова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2008. № 2. С. 41–45.
6. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения: РД 153-34.2-002-01. М.: Минэнерго России, 2001. 59 с.
7. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судоводных гидротехнических сооружений [Электронный ресурс]: приказ МЧС и Минтранса РФ от 2 октября 2007 г. № 528/143. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902075525>. Дата доступа: 26.11.2021.
8. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 4. С. 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>.
9. Гончаров, В. Л. Динамика русловых потоков / В. Л. Гончаров. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 373 с.

10. Пономарчук, К. Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины / К. Р. Пономарчук // *Природообустройство*. 2011. № 3. С. 77–82.
11. Оценка опасности Тетеринского водохранилища на реке Друть Круглянского района Могилевской области / В. В. Ивашечкин [и др.] // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2017. Т. 1, № 1. С. 62–70.
12. Веремениук, В. В. Моделирование процесса изменения уровней в каскаде из двух русловых водохранилищ при пропуске половодья / В. В. Веремениук, В. В. Ивашечкин, О. В. Немеровец // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 2. С. 146–154. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-146-154>.

Поступила 07.04.2021 Подписана в печать 15.06.2021 Опубликована онлайн 31.05.2022

REFERENCES

1. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Nemeravets O. V. (2021) Simulation of Unsteady Movement in the Downstream of a Hydroelectric Complex During the Destruction of a Soil Dam. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (6), 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567> (in Russian).
2. Malik L. K. (2005) *Risk Factors for Hydraulic Structures. Safety Issues*. Moscow, Nauka Publ. 354 (in Russian).
3. Shchedrin V. N., Kosichenko Y. M., Baklanov D. V., Baev O. A., Mihailov E. D. (2016) *Ensuring the Safety and Reliability of Low-Pressure Hydraulic Structures*. Novosibirsk, Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 283 (in Russian).
4. Levkevich V. E. (2018) Regularities of the Development of Coastal Processes on Water Reservoirs of Hydroelectric Power Plants of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 463–478. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-463-478> (in Russian).
5. Karpenchuk I. V., Striganova M. Yu. (2008) Determining the Parameters of the Breakout Wave and Assessment of the Possible Consequences of Flooding. *Vestnik Komandno-Inzhenernogo Instituta MChS Respubliki Belarus' [Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus]*, (2), 41–45 (in Russian).
6. RD [Guidance Document] 153-34.2-002-01. *Temporary Methodology for Assessing the Damage Possible as a Result of a Breakdown of a Hydraulic Structure*. Moscow, Ministry of Energy of the Russian Federation, 2001. 59 (in Russian).
7. *Methodology for Determining the Amount of Damage that Can be Caused to the Life, Health of Individuals, Property of Individuals and Legal Entities as a Result of an Accident of Navigable Hydraulic Technical Structures*. Order of Ministry of Emergency Situations and Ministry of Transport of the Russian Federation, October 2, 2007, № 528/143. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902075525> (Accessed 26 November 2021) (in Russian).
8. Bohaslauchyk P. M. (2018) Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow. *Nauka i Technika = Science & Technique*, 17 (4), 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296> (in Russian).
9. Goncharov V. L. (1962) *Channel Flow Dynamics*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 373 (in Russian).
10. Ponomarchuk K. R. (2011) Evaluation of Parameters for Closure Channel Development while Breaking Soil Dam. *Prirodoobustroystvo [Environmental Management]*, (3), 77–82 (in Russian).
11. Ivashechkin V. V., Veremenyuk V. V., Kruhlou G. G., Linkevich N. N., Murashko O. A., Nedashkovskaya I. V. (2017) The Risk Assessment of the Teterinskoye Reservoir on the Drut River in the Kругloye District in the Mogilev Region. *Vestnik Universiteta Grazhdanskoi Zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, 1 (1), 62–70 (in Russian).
12. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Nemerovets O. V. (2019) Modeling of Process for Level Changes in Cascade of Two Channel Water Reservoirs in Case of Flooding. *Nauka i Technika = Science and Technique*, 18 (2), 146–154. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-146-154> (in Russian).

Received: 7 April 2021

Accepted: 15 June 2021

Published online: 31 May 2022