

Учредитель

Министерство образования Республики Беларусь

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

22 декабря – День энергетика

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Румянцев Ю. В., Ромانيук Ф. А.** Разработка в MATLAB-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока. Часть 1 479
- Капустинский А. Ю., Константинова С. В.** Способы токоограничения в электрических сетях до 1 кВ 492
- Прайт В. А., Гоман В. В., Парамонов А. С.** Оптимизация параметров вторичного элемента односторонних линейных асинхронных электродвигателей с использованием генетического алгоритма 505

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Opiatiuk V. V., Kozlov I. L., Skalozubov V. I., Ostapenko I. A.** Study of Parametric Interactions in the Nuclear Reactor Control with Feedback (Опятюк В. В., Козлов И. Л., Скалозубов В. И., Остапенко И. А. Исследование параметрических взаимодействий при регулировании ядерного реактора с обратной связью) 517
- Pekhota A. N., Khroustalev V. M., Vu Minh Phap, Romaniuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen Thuy Nga.** Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water (Пехота А. Н., Хрусталева В. М., Ву Минь Фап, Романиук В. Н., Пехота Е. А., Вострова Р. Н., Нгуен Тху Нга. Технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием отходов сточных вод) 525
- Петраш В. Д., Макаров В. О., Хоменко А. А.** Эффективность парокompрессионной трансформации энергетических потоков для теплоснабжения на основе морской воды 538

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Веремениук В. В., Ивашечкин В. В., Немеровец О. В.** Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины 554
- Перечень статей, опубликованных в журнале «Энергетика» в 2021 г.**
- I. Тематический указатель** 568
- II. Именной указатель** 571

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

- В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),*
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
К. В. ДОБРЕГО (Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),
П. В. ЖУКОВСКИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. 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),
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 30.11.2021. 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 . 2021. 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, 2021

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 64, No 6
2021

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Ministry of Education of the Republic of Belarus

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

22nd December – Day of Power Engineer

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A.** An Artificial Neural Network Developed in MATLAB-Simulink for Reconstruction a Distorted Secondary Current Waveform. Part 1 479
- Kapustsinski A. Yu., Kanstantsinava S. V.** Methods of Current Limitation in Low Voltage (up to 1 kV) Electric Networks 492
- Prakht V. A., Goman V. V., Paramonov A. S.** Design Optimization of Secondary Element of Single-Sided Linear Induction Motors Using a Genetic Algorithm 505

HEAT POWER ENGINEERING

- Opiatiuk V. V., Kozlov I. L., Skalozubov V. I., Ostapenko I. A.** Study of Parametric Interactions in the Nuclear Reactor Control with Feedback 517
- Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu Minh Phap, Romaniuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen Thuy Nga.** Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water 525
- Petrash V. D., Makarov V. O., Khomenko A. A.** The Efficiency of Vapor Compression Transformation of Energy Flows for Heat Supply Based on the Sea Water 538

HYDRAULIC POWER ENGINEERING

- Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Nemeravets O. V.** Simulation of Unsteady Movement in the Downstream of a Hydroelectric Complex During the Destruction of a Soil Dam 554

List of Papers Published in “Energetika” Journal, 2021

- I. Thematic index.** 568
- II. Name index.** 571

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- W. T. WÓJCIK (*Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland*),
V. V. GALAKTIONOV (*Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation*),
M. DADO (*Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic*),
K. V. DOBREGO (*Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*) (*Deputy Editor-in-Chief*),
I. V. ZHEZHELENKO (*Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine*),
P. W. ZHUKOWSKI (*Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland*),
V. V. IVASHECHKIN (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
A. S. KALINICHENKO (*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*),
A. 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*),
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 30.11.2021. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 100 copies. Date of publishing 2021. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 320-65-14
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, 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-479-491>

УДК 621.316.925

Разработка в MATLAB-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока

Часть 1

Ю. В. Румянцев¹⁾, Ф. А. Романюк¹⁾

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

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

Реферат. В последнее время наблюдается повышенный интерес к применению искусственных нейронных сетей в различных отраслях электроэнергетики, в том числе в релейной защите. Существующие микропроцессорные устройства релейной защиты используют традиционную цифровую обработку контролируемых сигналов, сводящуюся к умножению значений последовательных выборок контролируемых сигналов тока и напряжения на заранее определенные коэффициенты с целью установления их действующих величин. При этом вычисляемые действующие значения часто не отражают реальных процессов, происходящих в защищаемом электрооборудовании ввиду, например, насыщения трансформатора тока апериодической составляющей тока повреждения. При насыщении трансформатора тока его вторичный ток имеет характерную непериодическую искаженную форму, существенно отличающуюся от его первичной (истинной) формы, что ведет к занижению вычисляемого действующего значения вторичного тока по сравнению с его истинной действующей величиной. Указанное приводит к затягиванию времени срабатывания или вовсе к отказу функционирования устройств релейной защиты электрооборудования. Использование искусственной нейронной сети совместно с традиционной цифровой обработкой сигналов обеспечивает иной подход к функционированию как измерительной, так и логической частей микропроцессорного устройства релейной защиты, что позволяет значительно повысить быстродействие и надежность функционирования таких устройств релейной защиты по сравнению с их традиционной реализацией. Возможное приложение искусственной нейронной сети для целей релейной защиты заключается в определении факта возникновения повреждения и его вида, восстановлении формы искаженного сигнала вторичного тока трансформатора тока вследствие его насыщения до истинного значения, установлении искаженных и неискаженных участков сигнала вторичного тока трансформатора тока при его насыщении, выявлении аномальных режимов работы силового оборудования, сопровождающихся искажением контролируемых устройствами релейной защиты величин, таких как бросок тока намагничивания силового трансформатора. В статье детально рассмотрены этапы практической реализации искусственной нейронной сети в среде имитационного

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

моделирования MATLAB-Simulink на примере ее использования для восстановления искаженной вследствие насыщения формы вторичного тока трансформатора тока.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, релейная защита, трансформатор тока, насыщение, MATLAB-Simulink

Для цитирования: Румянцев, Ю. В. Разработка в MATLAB-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока. Часть 1 / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 6. С. 479–491. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-479-491>

An Artificial Neural Network Developed in MATLAB-Simulink for Reconstruction a Distorted Secondary Current Waveform

Part 1

Yu. V. Rumiantsev¹⁾, F. A. Romaniuk¹⁾

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

Abstract. Recently, there has been an increased interest in the use of artificial neural networks in various branches of the electric power industry including relay protection. Artificial neural networks are one of the fastest growing areas in artificial intelligence technology. Recently, there has been an increased interest in the use of artificial neural networks in the electric power engineering, including relay protection. Existing microprocessor-based relay protection devices use a traditional digital signal processing of the monitored signals which is reduced to a multiplying the values of successive samples of the monitored current and voltage signals by predetermined coefficients in order to calculate their RMS values. In this case, the calculated RMS values often do not reflect the real processes occurring in the protected electrical equipment due to, for example, current transformer saturation because of the DC component presence in the fault current. When the current transformer is saturated, its secondary current waveform has a characteristic non-periodic distorted form, which is significantly differs from its primary (true) waveform, which causes underestimation of the calculated RMS value of the secondary current compared to its true value. In its turn, this causes to a trip time delay or even to a relay protection devices operation failure. The use of artificial neural networks in conjunction with a traditional digital signal processing provides a different approach to the functioning of both the measuring and logical parts of the microprocessor-based relay protection devices, which significantly increases the speed and reliability of such relay protection devices in comparison with their traditional implementation. A possible application of the artificial neural networks for the relay protection purposes is the fault occurrence detection and its type identification, current transformer secondary current waveform distortion restoration due to its saturation up to its true value, detection the distorted and undistorted sections of the current transformer secondary current waveform during its saturation, primary power equipment abnormal operating modes detection, for example, power transformer magnetizing current inrush. The article describes in detail the stages of the practical implementation of the artificial neural networks in the MATLAB-Simulink environment by the example of its use to restore the distorted current transformer secondary current waveform due to saturation.

Keywords: artificial neural network, relay protection, current transformer, saturation, MATLAB-Simulink

For citation: Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A. (2021) An Artificial Neural Network Developed in MATLAB-Simulink for Reconstruction a Distorted Secondary Current Waveform. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 479–491. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-479-491> (in Russian)

Введение

Правильность функционирования релейной защиты определяется, в общем, фактором случайности и неопределенности [1]. Невозможно заранее предугадать, какое появится повреждение и какие токи при этом будут его сопровождать, в какой момент времени возникнет повреждение, будет ли происходить насыщение трансформатора тока (ТТ) и с какой степенью.

К насыщению ТТ и, как следствие, неправильному его функционированию приводят следующие факторы: наличие экспоненциально затухающей апериодической составляющей в токе повреждения, превышение установленного током повреждения допустимого значения, наличие остаточной намагниченности стали магнитопровода ТТ и превышение допустимого сопротивления нагрузки, подключенной ко вторичным цепям.

При насыщении ТТ, например при наличии экспоненциально затухающей апериодической составляющей в токе повреждения, его вторичный ток имеет характерную непериодическую искаженную форму (рис. 1), существенно отличающуюся от его первичной (идеальной, истинной) формы, т. е. от такой формы, ток которой протекал бы во вторичных цепях ТТ и подводился к устройствам релейной защиты (РЗ) при отсутствии насыщения. В результате происходит занижение вычисляемого РЗ действующего значения протекающего вторичного тока по сравнению с его истинным действующим значением, что ведет к значительному затягиванию времени срабатывания РЗ или вовсе к отказу ее функционирования, так как устройства токовой РЗ срабатывают при превышении протекающим в месте их установки током заранее установленного значения – уставки срабатывания [2, 3]. Как видно из рис. 1, время срабатывания РЗ t_2 при наличии насыщения ТТ в пять раз превышает время срабатывания РЗ t_1 при его отсутствии. Полученная задержка ликвидации повреждения может повлечь за собой термические повреждения электрооборудования и нарушение селективности устройств РЗ рассматриваемой части энергосистемы, т. е. можно говорить, что в представленном случае отсутствовало правильное функционирование устройства РЗ.

В некоторых современных устройствах РЗ используются специализированные алгоритмы, позволяющие защите правильно функционировать при определенных степенях насыщения ТТ. Данные алгоритмы построены на традиционной цифровой обработке сигналов и в основном производят восстановление искаженных участков сигналов вторичного тока, используя специальные информационные параметры, рассчитанные на участках сигналов вторичного тока, предшествующих насыщению, – так называемых участках точной трансформации [4–6].

Такие алгоритмы сложны, требуют большого количества входной информации, имеют множество ограничений и не всегда эффективны. Искусственная нейронная сеть (ИНС) свободна от указанных недостатков и дает возможность обеспечить правильное функционирование РЗ в условиях

насыщения ТТ (применительно к рис. 1: использование ИНС совместно с РЗ позволяет максимально приблизить кривую 3 к кривой 4, тем самым обеспечив приблизительное равенство времен $t_2 \approx t_1$).

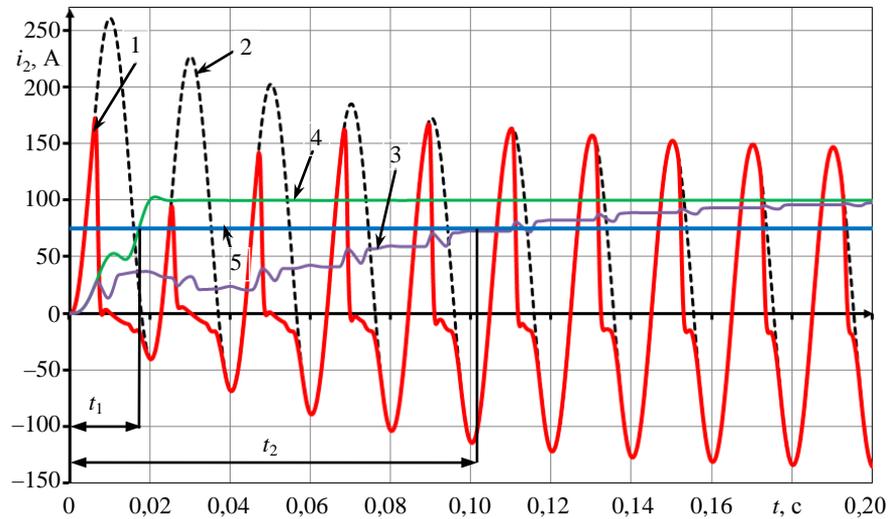


Рис. 1. Форма вторичного тока трансформатора тока при его насыщении: 1, 2 – реальный и идеальный вторичные токи; 3, 4 – действующее значение реального и идеального вторичных токов; 5 – уставка срабатывания токовой релейной защиты

Fig. 1. Current transformer secondary current waveform during saturation: 1, 2 – real and ideal secondary currents; 3, 4 – real and ideal secondary currents RMS value; 5 – relay protection trip threshold

Архитектура искусственной нейронной сети

Своим появлением ИНС обязана развитию знаний о принципах функционирования человеческого мозга, а именно нейрона, обладающего возможностью получения, обработки и дальнейшей передачи электрохимических сигналов по нервным путям [7]. Искусственный нейрон (рис. 2) в ИНС представляет собой единицу обработки информации и является упрощенным прототипом биологического нейрона, предназначенного для выполнения аналогичных функций в мозге.

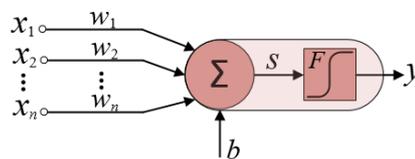


Рис. 2. Модель искусственного нейрона

Fig. 2. Artificial neuron model

Искусственный нейрон можно представить как вычислительный узел, на входы которого поступают некоторые входные значения (x_1, x_2, \dots, x_n). Каждый вход нейрона имеет свой собственный весовой коэффициент

циент (w_1, w_2, \dots, w_n) , т. е. перед поступлением в нейрон каждое входное значение умножается на соответствующий весовой коэффициент (вес) и только после этого поступает непосредственно в нейрон, где суммируется с остальными взвешенными значениями, поступившими на другие входы, и с величиной смещения b , предназначенного для более точной подстройки значения на выходе нейрона. Таким образом, в нейроне формируется некоторое промежуточное выходное значение $S = (x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n) + b$, поступающее на вход активационной функции F , на выходе которой и формируется окончательное выходное значение нейрона y . Назначением указанной функции является ограничение амплитуды значения S до уровня выходной величины y .

Существует большое разнообразие активационных функций F . Рассмотрим одну из наиболее распространенных нелинейных функций – гиперболический тангенс, которая в зависимости от поступающего на ее вход значения S возвращает на свой выход величину y в диапазоне (-1) – 1 . Таким образом, выходное значение нейрона зависит от многих переменных

$$y = f([x_1, x_2, \dots, x_n], [w_1, w_2, \dots, w_n], b, F).$$

Для построения ИНС образующие ее нейроны должны быть определенным образом объединены в так называемые слои, где каждый нейрон соединен с каждым из нейронов предыдущего и последующего слоев, причем связь между нейронами одного слоя отсутствует. В общем случае ИНС состоит из входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев и выходного слоя (рис. 3). В качестве функции активации для нейронов выходного слоя часто используют линейные функции, которые возвращают на свой выход поступающее на вход значение. Это нужно при выполнении задач аппроксимации, чтобы не ограничивать выходные величины ИНС каким-либо диапазоном. При отсутствии такой необходимости (например, при решении задач классификации) может использоваться нелинейная функция.

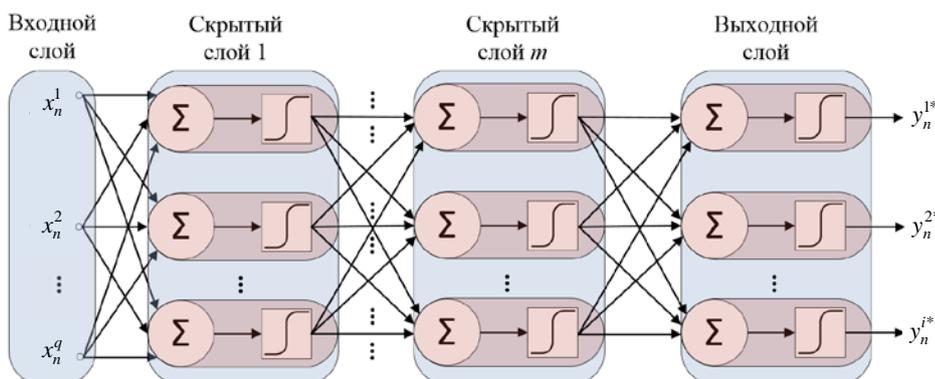


Рис. 3. Одна из возможных конфигураций многослойной искусственной нейронной сети

Fig. 3. One of the possible configurations of a multilayer artificial neural network

Следует отметить, что вычисления производятся только в скрытых и выходном слоях, входной слой не содержит нейронов и предназначен исключительно для ввода в ИНС входных значений. Веса w и смещения b на рис. 3 не показаны.

Для получения высокой производительности количество скрытых слоев может быть более одного, тогда сети называются многослойными ИНС. При этом число как самих слоев, так и нейронов в них может различаться и подбирается опытным путем. В данных сетях выходы предыдущего слоя являются входами последующего. Однако для аппроксимации нелинейных зависимостей между входными и выходными значениями достаточно иметь ИНС с одним скрытым слоем и приемлемым числом нейронов в нем [8].

После того как выбрана конфигурация ИНС, ее необходимо обучить. Под процессом обучения понимается совокупность действий, приводящих к тому, что ИНС на своих выходах возвращает желаемые (или близкие к ним) значения при заданных входных. Для обучения требуется заранее подготовленный набор обучающих данных, состоящий из пар входных и соответствующих им выходных значений:

$$\left[(x_1^1 \dots x_1^q, y_1^1 \dots y_1^i), (x_2^1 \dots x_2^q, y_2^1 \dots y_2^i) \dots (x_n^1 \dots x_n^q, y_n^1 \dots y_n^i) \right],$$

где $x_n^1 \dots x_n^q$ – входные значения обучающей пары; $y_n^1 \dots y_n^i$ – соответствующие $x_n^1 \dots x_n^q$ выходные (желаемые) величины обучающей пары.

При этом количество входных значений q обучающей пары может не равняться числу ее выходных величин i , но для каждой обучающей пары набора указанное соотношение должно быть одинаковым. Количество обучающих пар n должно по возможности описывать практически все режимы функционирования заменяемого ИНС реального объекта.

Упрощенно обучение сводится к последовательной многократной подаче на входы ИНС значений $x_n^1 \dots x_n^q$ каждой обучающей пары, сравнению возвращаемых ИНС величин $y_n^{1*} \dots y_n^{i*}$ со значениями $y_n^1 \dots y_n^i$ и вычислению ошибки (разницы между желаемой и полученной величинами). Далее при известной величине ошибки по специальному алгоритму обратного распространения происходит корректировка значений весовых коэффициентов w и смещений b с целью минимизации получаемой ошибки обучения. Из вышеизложенного следует, что обучение ИНС – это процесс поиска глобального минимума многомерной функции ошибки, переменными для которой являются всевозможные сочетания весов и смещений.

При успешном завершении обучения можно утверждать, что ИНС произвела аппроксимацию нелинейного отображения между входными и выходными обучающими данными и приобрела способность возвращать желаемые значения на свои выходы при подаче на ее входы величин, равных или близких к входным значениям обучающего набора.

Процесс обучения прекращается при достижении усредненной для всех пар набора обучающих данных ошибкой некоторого малого значения, или при превышении заданного числа эпох алгоритма обучения (числа проговов всех пар набора обучающих данных через ИНС), или в случае превышения заданного времени обучения. Однако ни один из перечисленных критериев остановки обучения не гарантирует успешность данного процесса, так как при аппроксимации нелинейных зависимостей ошибка ИНС не может равняться нулю, а точное приемлемое ее значение заранее знать невозможно. И даже минимизация ошибки не свидетельствует о качестве обучения, поскольку мощность ИНС бывает в принципе недостаточной или избыточной для аппроксимации требуемой зависимости либо же найденный минимум ошибки оказывается локальным, а не глобальным [9].

Наиболее серьезная проблема при обучении ИНС – ее переобучение, т. е. потеря главного свойства – обобщения, что проявляется в неспособности ИНС правильно функционировать при подаче на ее входы значений, которые отсутствовали в наборе обучающих данных, но близки к ним. Способность ИНС к обобщению по сути является интерполированием, возможностью предсказывать неизвестные значения функции по их известным смежным величинам. Стоит отметить, что ИНС не обладает свойствами экстраполяции (т. е. способностью предсказывать значения вне диапазона обучающих данных), поэтому набор обучающих данных должен охватывать весь возможный диапазон их изменения [10].

Переобучение возникает при чрезмерном по отношению к сложности решаемой задачи количестве нейронов в ИНС. Тогда вычислительная мощность (гибкость) ИНС, определяемая числом свободных параметров – весов w и смещений b , оказывается намного больше, чем необходимо для выполнения аппроксимации нелинейного отображения между входными и выходными обучающими данными.

Существуют два пути решения указанной выше проблемы: постепенное упрощение конфигурации ИНС до нахождения достаточного количества свободных параметров, обеспечивающих оптимальную с точки зрения решаемой задачи конфигурацию ИНС, либо использование специальных искусственных методов ограничения мощности ИНС без изменения ее конфигурации.

Чем большие значения присваиваются свободным параметрам ИНС в процессе обучения, тем выше ее вычислительная мощность. Поэтому если не позволить им приобрести большие значения, это ограничит вычислительную мощность ИНС с неоптимальной по отношению к решаемой задаче конфигурацией, и такая ИНС с искусственно ограниченными значениями свободных параметров по своей мощности сравняется с ИНС с оптимальной конфигурацией.

Рассмотрим один из подобных методов, так называемую раннюю остановку, основанный на остановке обучения ИНС до момента приобретения

ее весами и смещениями больших значений. В этом случае некоторая часть набора обучающих данных резервируется в качестве проверочного набора и непосредственно не участвует в процессе обучения. Периодически обучение прерывается, и проверочный набор подается на входы ИНС для оценки получаемой ошибки. Если ошибка с каждым разом применения проверочного набора уменьшается, это свидетельствует о том, что переобучение ИНС отсутствует и процесс обучения продолжается. Так происходит до тех пор, пока ошибка на наборе обучающих данных не уменьшится до некоторого малого значения или будет достигнуто максимальное число эпох обучения при условии одновременного монотонного уменьшения ошибки на проверочном наборе.

В случае если обе ошибки в процессе обучения не достигли достаточного малого значения за максимальное число итераций, это может указывать на то, что ИНС не обладает необходимой мощностью для решения поставленной задачи и ее конфигурацию следует изменить в сторону увеличения количества нейронов.

Если получаемая ошибка на проверочном наборе начинает монотонно увеличиваться заданное количество эпох подряд, это свидетельствует о том, что ИНС переобучается, т. е. приобретает избыточную для конкретного набора обучающих данных вычислительную мощность за счет увеличения значений свободных параметров. В данном случае обучение останавливается и алгоритм обучения возвращает ИНС весовые коэффициенты w и смещения b , при которых ошибка на проверочном наборе была минимальной.

Поскольку проверочный набор в процессе обучения используется многократно, он может влиять на процесс обучения ИНС, становясь как бы частью обучающего набора, что, в свою очередь, может приводить к получению недостоверных результатов. В связи с этим из набора обучающих данных резервируется еще одна часть – тестовый набор, который применяется один раз уже после окончания обучения ИНС для подтверждения адекватности показателей качества ее функционирования, полученных на обучающем и проверочном наборах [11].

Еще одним известным методом ограничения мощности ИНС без изменения ее конфигурации является регуляризация. Процесс обучения контролируется специальным алгоритмом, минимизирующим не только ошибку ИНС, но и квадратичную сумму значений ее весов и смещений, что не позволяет им увеличиваться до больших значений. В этом случае не требуется формирование проверочного набора данных, поэтому большее их количество может использоваться для обучающего набора.

Для обеспечения эффективности и скорости процесса обучения ИНС входные и соответствующие им выходные значения обучающих пар набора обучающих данных должны быть соответствующим образом предварительно обработаны. Например, основным требованием, предъявляемым к входным данным ИНС, является их нормализация к интервалу $(-1)-1$ при наличии в наборе обучающих данных отрицательных значений или к интервалу $(0)-1$ при наличии только положительных значений. Поскольку

эта операция связана с особенностями функционирования алгоритма обучения, к выходным значениям ИНС должна применяться обратная операция, восстанавливающая реальный масштаб набора обучающих данных.

Приложение искусственной нейронной сети для целей релейной защиты

Одно из наиболее перспективных приложений ИНС для РЗ – восстановление искаженной формы сигнала вторичного тока ТТ вследствие насыщения его магнитопровода до истинной формы [12–19]. Если положить, что вторичный ток ТТ является функцией его первичного тока, то цель обучения ИНС заключается в аппроксимации нелинейной зависимости между вторичными и соответствующими им значениями приведенного первичного тока для нахождения инверсной функции, по которой будет осуществляться восстановление формы сигнала вторичного тока ТТ.

Рассмотрим этапы реализации ИНС в системе имитационного моделирования MATLAB-Simulink с использованием пакета расширения Neural Network Toolbox [11] (в последних версиях пакет носит название Deep Learning Toolbox).

Набор обучающих данных должен содержать пары дискретизированных по времени сигналов вторичного тока ТТ (входные значения) и соответствующих им сигналов приведенного первичного тока ТТ (выходные или желаемые значения). Для формирования набора обучающих данных в системе MATLAB-Simulink с использованием блоков пакета расширения SimPowerSystems [20] (Simscape Power Systems в последних версиях) реализована модель части энергосистемы, представленная на рис. 4.

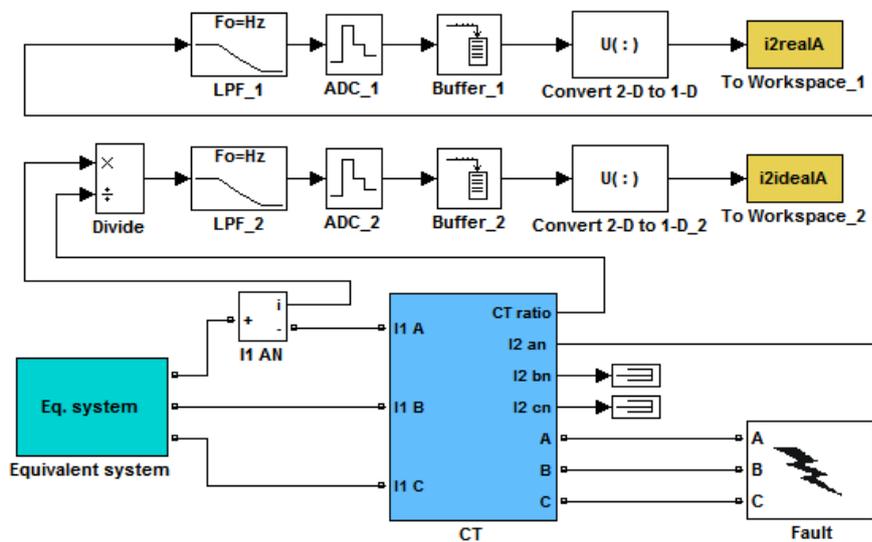


Рис. 4. Формирование набора обучающих данных с использованием модели части энергосистемы, реализованной в MATLAB-Simulink

Fig. 4. Training dataset preparing with the use a MATLAB-Simulink model of an equivalent power system

Рассматриваемая модель включает следующие элементы. Питающая эквивалентная энергосистема (Equivalent system) представляется стандартным блоком модели трехфазного источника напряжения Three-Phase Source. В связи с отсутствием в стандартной библиотеке SimPowerSystems блока ТТ (СТ) он разработан и реализован с использованием стандартных блоков Simulink в соответствии с [21]. Повреждение (Fault) представляется стандартным библиотечным блоком модели трехфазного короткозамыкателя Three-Phase Fault, моделирующим трехфазное устройство, замыкающее фазы между собой, а также на землю. Генерируемые сигналы реального вторичного и приведенного через коэффициент трансформации первичного тока ТТ, подаваемые на вход аналого-цифрового преобразователя (ADC), должны предварительно проходить через фильтр низших частот (LPF). Фильтр низших частот представляется блоком модели 2nd-Order Filter, основной его параметр – значение частоты среза. Аналого-цифровой преобразователь представляется блоком модели Zero-Order Hold, параметром которого является отношение значения длительности периода промышленной частоты к величине числа выборок за данный период. Примем частоту дискретизации, равную 32 отсчетам (выборкам) на период промышленной частоты. Измерение первичного тока (I1 AN) и операция деления представляются блоками Current Measurement и Divide соответственно, данные блоки параметров не имеют. Блоки моделей Buffer, Convert 2-D to 1-D и To Workspace предназначены для формирования из дискретизированных сигналов токов ТТ набора обучающих данных таким образом, что входные (i2realA) и выходное (i2idealA) значения каждой обучающей пары набора являются цифровым отображением скользящего вдоль указанных сигналов тока окна данных.

Формируемый набор обучающих данных должен по возможности отражать все формы вторичного тока ТТ, искаженные вследствие его насыщения. Для их получения необходимо произвести многократный запуск разработанной модели части энергосистемы с изменяющимися в широком диапазоне параметрами блока, моделирующего питающую эквивалентную систему. Общее число запусков модели определяется условием, при выполнении которого осуществляется перебор между собой всех сочетаний значений изменяющихся параметров модели с учетом шага их изменения.

Трансформатор тока принят со следующими параметрами: коэффициент трансформации 600/5 А (т. е. $I_{\text{ном}} = 600$ А), номинальная предельная кратность ($K_{\text{ном}}$) 20, номинальная вторичная нагрузка ($S_{\text{ном}}$) 20 В·А, фактическая вторичная нагрузка ($S_{\text{н}}$) 20 В·А, класс точности 10Р.

Действующее значение тока КЗ $I_{\text{кз}}$ изменяется в диапазоне $(0,5I_{\text{ном}}K_{\text{ном}} - 3I_{\text{ном}}K_{\text{ном}})$ А. Постоянная времени экспоненциально затухающей аperiodической составляющей тока повреждения τ изменяется в диапазоне 0–0,1 с. Угол возникновения повреждения φ изменяется в диапазоне 0–360°.

В связи с изменением во всем возможном диапазоне φ набор обучающих данных формировался с использованием только токов ТТ фазы А.

Момент возникновения повреждения соответствует моменту начала моделирования.

Время симуляции модели составляло два периода промышленной частоты – 0,04 с. Таким образом, после каждого запуска модели формируются (с учетом скользящего окна данных) по 32 пары набора обучающих данных для каждого периода промышленной частоты, т. е. суммарно для двух периодов – 64 пары. Процесс многократного запуска и изменения параметров модели автоматизирован средствами MATLAB.

Результаты выполненных исследований будут представлены во второй части статьи.

ВЫВОДЫ

1. Анализ функциональных возможностей искусственных нейронных сетей подтверждает целесообразность их использования в технике релейной защиты.

2. Одним из наиболее перспективных приложений искусственной нейронной сети для целей релейной защиты является восстановление искаженного сигнала вторичного тока трансформатора тока до истинной формы.

3. Реализованная в среде имитационного моделирования MATLAB-Simulink модель части энергосистемы позволяет формировать набор данных для обучения искусственной нейронной сети восстановлению искаженной формы вторичного тока трансформатора тока вследствие насыщения его магнитопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалин, А. И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем / А. И. Шалин. Новосибирск: НГТУ, 2002. 383 с.
2. 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>.
3. Формирование ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 3. С. 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201>.
4. Pan, J. An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects / J. Pan, K. Vu, Y. Hu // IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. Vol. 19, Iss. 4. P. 1623–1628. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835273>.
5. Villamagna, N. A CT Saturation Detection Algorithm Using Symmetrical Components for Current Differential Protection / N. Villamagna, P. Crossley // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21, Iss. 1. P. 38–45. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848654>.
6. Wiszniewski, A. Correction of Current Transformer Transient Performance / A. Wiszniewski, W. Rebizant, L. Schiel // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. Vol. 23, Iss. 2. P. 624–632. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.915832>.

7. Haykin, S. *Neural Networks and Learning Machines* / S. Haykin. 3rd ed. Pearson Education India, 2010. 936 p.
8. Cybenko, G. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function / G. Cybenko // *Mathematics of Control, Signals and Systems*. 1989. Vol. 2, Iss. 4. P. 303–314. <https://doi.org/10.1007/bf02551274>.
9. *Neural Network Toolbox. User's Guide. Version 4* [Electronic Resource]. The MathWorks, 2002. Mode of access: http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/nnet.pdf.
10. *Neural Network Design* / M. T. Hagan [et al.], 2nd ed. Boston: PWS Publishing, 2014. 1012 p.
11. Медведев, В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. М.: Диалог-МИФИ, 2002. 496 с.
12. Rebizant, W. *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control* / W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski. London: Springer, 2011. 316 p.
13. Correction of Current Transformer Distorted Secondary Currents Due to Saturation Using Artificial Neural Networks / D. C. Yu [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2011. Vol. 16, Iss. 2. P. 189–194. <https://doi.org/10.1109/61.915481>.
14. Khorashadi-Zadeh, H. Correction of Saturated Current Transformers Secondary Current Using ANNs / H. Khorashadi-Zadeh, M. Sanaye-Pasand // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 21, Iss. 1. P. 73–79. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.858799>.
15. Application of Neural Networks in Numerical Busbar Protection Systems (NBPS) / K. Feser [et al.] // *Proceedings of the First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems*. 1991. P. 117–121. <https://doi.org/10.1109/ANN.1991.213508>.
16. Lukowicz, M. Artificial Neural Network Based Dynamic Compensation of Current Transformer Errors / M. Lukowicz, E. Rosolowski // *Proceedings of the 8th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems*. 2000. P. 19–24.
17. Haghjoo, F. Compensation of CT Distorted Secondary Current Waveform in Online Conditions / F. Haghjoo, M. H. Pak // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 31, Iss. 2. P. 711–720. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2448634>.
18. Application of ANN Methods for Instrument Transformer Correction in Transmission Line Protection / M. M. Saha [et al.] // *Developments in Power System Protection, 7th International Conference*. 2001. P. 303–306. <https://doi.org/10.1049/cp:20010160>.
19. Cummins, J. C. Simplified Artificial Neural Network Structure with the Current Transformer Saturation Detector Provides a Good Estimate of Primary Currents / J. C. Cummins, D. C. Yu, L. A. Kojovic // *Power Engineering Society Summer Meeting*. 2000. Vol. 3. P. 1373–1378. <https://doi.org/10.1109/pess.2000.868725>.
20. *SimPowerSystems. User's Guide. Version 5* [Electronic Resource]. The MathWorks, 2011. Mode of access: <https://all-guidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
21. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 5. С. 23–38.

Поступила 31.08.2021 Подписана в печать 02.11.2021 Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Shalin A. I. (2002) *Reliability and Diagnostics of Relay Protection of Power Systems*. Novosibirsk, NSTU. 383 (in Russian).
2. 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).
3. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Formation of Orthogonal Components of Input Currents in Microprocessor Protections of Electrical Equip-

- ment. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201> (in Russian).
4. Pan J., Vu K., Hu Y. (2004) An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19 (4), 1623–1628. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835273>.
 5. Villamagna N., Crossley P. (2006) A CT Saturation Detection Algorithm Using Symmetrical Components for Current Differential Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21 (1), 38–45. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848654>.
 6. Wiszniewski A., Rebizant W., Schiel L. (2008) Correction of Current Transformer Transient Performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (2), 624–632. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.915832>.
 7. Haykin S. (2010) *Neural Networks and Learning Machines*. 3rd ed. Pearson Education India. 936.
 8. Cybenko G. (1989) Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2 (4), 303–314. <https://doi.org/10.1007/bf02551274>.
 9. *Neural Network Toolbox. User's Guide. Version 4*. The MathWorks, 2002. Available at: http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/nnet.pdf.
 10. Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. H., Jes O. D. (2014) *Neural Network Design*. 2nd ed. Boston, PWS Publishing. 1012.
 11. Medvedev V. S., Potemkin V. G. (2002) *Neural Network. MATLAB 6*. Moscow, Dialog-MIFI Publ. 496 (in Russian).
 12. Rebizant W., Szafran J., Wiszniewski A. (2011) *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. London, Springer Publ. 316.
 13. Yu D. C., Cummins J. C., Wang Z., Yoon H. J., Kojovic L. A. (2011) Correction of Current Transformer Distorted Secondary Currents Due to Saturation Using Artificial Neural Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16 (2), 189–194. <https://doi.org/10.1109/61.915481>.
 14. Khorashadi-Zadeh H., Sanaye-Pasand M. (2005) Correction of Saturated Current Transformers Secondary Current Using ANNs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21 (1), 73–79. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.858799>.
 15. Feser K., Braun U., Engler F., Maier A. (1991) Application of Neural Networks in Numerical Busbar Protection Systems (NBPS). *Proceedings of the First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems*, 117–121. <https://doi.org/10.1109/ANN.1991.213508>.
 16. Lukowicz M., Rosolowski E. (2000) Artificial Neural Network Based Dynamic Compensation of Current Transformer Errors. *Proceedings of the 8th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems*, 19–24.
 17. Haghjoo F., Pak M. H. (2015) Compensation of CT Distorted Secondary Current Waveform in Online Conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31 (2), 711–720. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2448634>.
 18. Saha M. M., Izykowski J., Lukowicz M., Rosolowski E. (2001) Application of ANN Methods for Instrument Transformer Correction in Transmission Line Protection. *Developments in Power System Protection, 7th International Conference*, 303–306. <https://doi.org/10.1049/cp:20010160>.
 19. Cummins, J. C., Yu D. C., Kojovic L. A. (2000) Simplified Artificial Neural Network Structure with the Current Transformer Saturation Detector Provides a Good Estimate of Primary Currents. *Power Engineering Society Summer Meeting*, 3, 1373–1378. <https://doi.org/10.1109/pess.2000.868725>.
 20. *SimPowerSystems. User's Guide. Version 5*. The MathWorks, 2011. Available at: <https://all-guidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
 21. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 23–38 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-492-504>

УДК 620.9

Способы токоограничения в электрических сетях до 1 кВ

А. Ю. Капустинский^{1, 2)}, С. В. Константинова¹⁾

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

²⁾ОДО «ЭНЭКА» (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. В статье рассмотрены и систематизированы причины возникновения высоких значений токов короткого замыкания в электрических сетях до 1кВ и указаны их негативные последствия. Приведен краткий анализ некоторых способов токоограничения (с дополнительным вложением средств и без него), позволяющих снизить негативные эффекты при протекании значительных токов короткого замыкания. Рассмотрены варианты реализации данных способов токоограничения, рекомендуемых к проработке на этапе проектирования или при замене оборудования, выработавшего свой ресурс. Указаны преимущества и недостатки описанных в статье методик ограничения токов короткого замыкания. Проанализированы варианты подключения оборудования с низким энергопотреблением в узлы электрической сети до 1кВ с высокими значениями токов короткого замыкания. Особое внимание уделено токоограничивающим аппаратам защиты, дано подробное описание конструкции некоторых из них, указаны преимущества их применения по сравнению с иными методами токоограничения, представлены соответствующие графики ограничения периодической составляющей тока короткого замыкания, ударного тока короткого замыкания и термического импульса. На основании анализа графических материалов рассмотрен вопрос обеспечения селективности защит. Изучена степень распространенности оборудования, обладающего свойством токоограничения. Приведен способ определения селективных токоограничивающих аппаратов защиты – метод энергетической селективности, представлен соответствующий график определения энергетической селективности. Описана физика процессов, позволяющих выявить степень эффективности ограничения тока короткого замыкания. Предложены варианты применения токоограничивающего оборудования.

Ключевые слова: короткое замыкание, токоограничение, автоматический выключатель, предохранитель, коэффициент токоограничения, характеристика токоограничения, токоограничивающая плавкая вставка, отключение, защита от коротких замыканий, расцепитель, энергетическая селективность, интеграл Джоуля, термический импульс

Для цитирования: Капустинский, А. Ю. Способы токоограничения в электрических сетях до 1 кВ / А. Ю. Капустинский, С. В. Константинова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 6. С. 492–504. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-492-504>

Адрес для переписки

Константинова Светлана Валерьевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
svkon2000@gmail.com

Address for correspondence

Kanstantsinava Sviatlana V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
svkon2000@gmail.com

Methods of Current Limitation in Low Voltage (up to 1 kV) Electric Networks

A. Yu. Kapustsinski^{1,2)}, S. V. Kanstantsinava¹⁾

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

²⁾ALC "ENECA" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article discusses and systematizes the causes of high values of short-circuit currents in electrical networks up to 1 kV and indicates their negative consequences. A brief analysis of some current limiting methods (both with and without additional investment) is given, which makes it possible to reduce the negative effects when significant short-circuit currents occur. The variants of the implementation of these current limiting methods recommended for study at the design stage or when replacing equipment that has exhausted its resource, are considered. The advantages and disadvantages of the methods of limiting short-circuit currents described in the article are indicated. Options for connecting equipment with low power consumption to nodes of the electrical network up to 1 kV with high values of short-circuit currents are also considered. Special attention is paid to current-limiting protection devices, a detailed description of the design of some of them is given, the advantages of their use in comparison with other current-limiting methods are indicated, the corresponding graphs of the limitation of the periodic component of the short-circuit current, shock short-circuit current and thermal pulse are presented. Based on the analysis of graphic materials, the issue of ensuring the selectivity of protections is considered. The degree of prevalence of equipment with the property of current limitation is determined. A method for determining selective current-limiting protection devices is given, viz. the method of energy selectivity, the corresponding graphs for determining energy selectivity are presented. The physics allowing to determine the degree of efficiency of limiting the short-circuit current is described. Recommendations on the use of current-limiting equipment are proposed.

Keywords: short circuit, current limitation, circuit breaker, fuse, current limitation index, current limitation curve, current limitation fuse link, trip, short circuit protection, trip unit, energy based selectivity, Joule integral, thermal pulse

For citation: Kapustsinski A. Yu., Kanstantsinava S. V. (2021) Methods of Current Limitation in Low Voltage (up to 1 kV) Electric Networks. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 492–504. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-492-504> (in Russian)

Введение

На шинах 0,4 кВ ТП 6/0,4 кВ и 10/0,4 кВ, а также на некоторых распределительных устройствах 0,4 кВ значение токов короткого замыкания (КЗ) часто достигает величины в несколько десятков килоампер. Одна из причин данного явления – значительный коэффициент трансформации для передачи той же величины электрической мощности на другом уровне напряжения. Высокое значение тока КЗ на рассматриваемых участках электрической сети имеет место при следующих условиях:

- высокой мощности энергосистемы в месте установки силового трансформатора;
- высокой мощности силового трансформатора (несколько сотен киловольт-ампер и выше);
- незначительной электрической удаленности распределительного устройства от шин 0,4 кВ ТП.

Наличие высокого тока КЗ приводит к существенному термическому и электродинамическому воздействию на электрооборудование, сборные шины и кабели, что, в свою очередь, требует использования дорогостояще-

го (термически и динамически более стойкого) оборудования, способного противостоять данному воздействию.

Основное удорожание схемы связано с необходимостью питания небольшой нагрузки (до 3 кВ·А при однофазной нагрузке и до 10 кВ·А при трехфазной) непосредственно от распределительного устройства 0,4 кВ ТП или в обход вводного выключателя ввиду низкой термической стойкости кабелей минимального допустимого по условию механической прочности сечения (2,5 мм²). Характерными потребителями малой мощности в данном узле энергосистемы являются, к примеру, щиты собственных нужд трансформаторных подстанций (ТП), шкафы автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), шкафы телемеханики (ТЛМ) или щиты аварийного освещения небольших помещений.

Значительное термическое и электродинамическое воздействие на электрооборудование приводит к его существенному износу.

Основная часть

Для снижения негативного воздействия при протекании большого тока КЗ применяют несколько способов токоограничения, уменьшающих вероятность деформации и разрушения оборудования, нарушения работы соседних измерительных приборов, возникновения пожара, что позволяет увеличить срок службы оборудования, снизить капитальные и дополнительные затраты на строительство объекта, применять каскадные соединения.

Наиболее простой способ снижения тока КЗ – установка силового трансформатора с повышенным значением напряжения КЗ ($U_{к\%}$). Напряжение КЗ трансформатора характеризует его полное сопротивление. Увеличение полного сопротивления подключенного последовательно элемента снижает значение тока КЗ за данным элементом. Для многих трансформаторов 10/0,4 и 6/0,4 кВ стандартные значения напряжения КЗ составляют 6 и 8 % для одного и того же типа трансформатора, производимого на одном заводе. Преимущество данного метода – отсутствие дополнительных затрат на установку оборудования, а недостатками являются увеличение потерь реактивной мощности и напряжения в трансформаторе и несколько меньшая распространенность трансформаторов с опцией выбора напряжения КЗ.

Дополнительных затрат не требует режимное токоограничение, подразумевающее запрет на включение дополнительных источников подпитки КЗ к определенным узлам диспетчерским путем или средствами автоматизации для уменьшения суммарного значения тока КЗ. К примеру, при наличии источников энергии для собственных нужд на промышленном предприятии, где преобладают потребители третьей категории по надежности электроснабжения, целесообразно подключать генерирующие источники к различным секциям и не допускать их параллельной работы при замкнутом секционном выключателе, т. е. отключать источники одной из секций в длительном ремонтном или послеаварийном режиме. Если промышленное предприятие подключено к узлу большой мощности энер-

госистемы и величина тока КЗ на выводах 6/10 кВ трансформаторов ТП имеет высокое значение, включение на параллельную работу трансформаторов может оказаться недопустимым, когда сопротивление энергосистемы гораздо меньше сопротивления трансформаторов и значение тока КЗ за трансформатором 6/0,4 кВ или 10/0,4 кВ определяется в большей степени сопротивлением трансформатора.

Однако подключение значительного числа потребителей энергии малой мощности непосредственно к сборным шинам 0,4 кВ ТП 6/0,4 кВ или 10/0,4 кВ или в обход вводного автоматического выключателя необходимо. Потребителями такого типа могут выступать собственные нужды ТП, оперативные вторичные цепи ячеек 6/10 кВ, оборудование АСКУЭ, ТЛМ и аварийное освещение. Перечисленное оборудование, за исключением аварийного освещения, необходимо подключать к сетям энергосистемы с использованием источников бесперебойного питания (ИБП). Они включаются в электрическую сеть последовательно, и ток КЗ перед входом ИБП остается неизменным, а на выходе ИБП за счет его конструкции (выпрямитель и инвертор в составе преобразователя ИБП) превышает номинальный выходной ток ИБП незначительно, обычно не более чем в 1,5–2 раза. Таким образом, подключение потребителей электроэнергии через ИБП также можно считать способом ограничения тока КЗ.

В сетях до 1 кВ для снижения величины токов КЗ возможно применение токоограничивающих реакторов, увеличивающих полное сопротивление цепи КЗ. Данный метод не имеет широкого распространения ввиду высокой стоимости токоограничивающих реакторов. Кроме того, указанное оборудование рассчитано на относительно небольшие токи (как правило, на номинальный ток до 200 А, реже до 600 А), что приводит к его децентрализованному применению и, как следствие, повышению стоимости данного технического решения. Рассматриваемый метод имеет те же недостатки, что и применение силового трансформатора с большим напряжением КЗ: увеличение потерь реактивной мощности и напряжения. Преимуществом же является увеличение напряжения на шинах 0,4 кВ ТП при КЗ на одной из отходящих линий, что позволяет сохранить в работе потребителей электроэнергии, получающих питание по данным линиям, при возникновении КЗ.

При децентрализации узлов нагрузки и применении кабелей и проводов небольшого сечения даже при высоком значении тока КЗ на шинах 0,4 кВ ТП 10/0,4 кВ и 6/0,4 кВ величины токов КЗ на шинах 0,4 кВ групповых щитков в редких случаях превышают паспортные значения отключающей способности модульных автоматических выключателей ввиду высокого удельного сопротивления кабелей и проводов малого сечения. Таким образом, рациональное построение схемы электроснабжения также может привести к уменьшению величины тока КЗ. Вместе с тем, в связи со снижением протекающей по линии электропередачи мощности, потери активной и реактивной мощностей, а также потери напряжения в большинстве случаев имеют тот же уровень, что и при централизованной схеме. Однако децентрализация узлов нагрузки не всегда рациональна, действенна и применима.

Описанные решения базируются на принципе увеличения последовательно включенного в цепь КЗ сопротивления. Гораздо большего эффекта при ограничении тока КЗ можно достичь применением автоматических выключателей и предохранителей с функцией токоограничения, предусматривающей отключение поврежденного участка до достижения током КЗ максимального значения. Использование данного метода позволяет избежать увеличения потерь реактивной мощности и напряжения. Вместе с тем введение дополнительного сопротивления в цепь КЗ может привести к тому, что значение тока однофазного КЗ в режиме с минимальным ожидаемым током КЗ на выводах наиболее удаленного потребителя не будет удовлетворять требованиям п. 1.7.79 Правил устройства электроустановок (кратность 3 по отношению к номинальному току плавкой вставки или номинальному току обратнoзависимой характеристики расцепителя для сети с глухозаземленной нейтралью) [1].

Снижение амплитуды и длительности протекания тока КЗ приводит к уменьшению количества выделяемой в проводниках и аппаратах энергии, что в свою очередь ведет к снижению сквозного тока, протекающего через автоматический выключатель (следовательно, снижению электродинамического воздействия при протекании тока КЗ), и снижению выделяющегося в оборудовании термического импульса (т. е. снижению теплового воздействия при протекании тока КЗ). Графическая зависимость, характеризующая ограничение ударного тока КЗ и снижение выделяемой тепловой энергии, приведена на рис. 1.

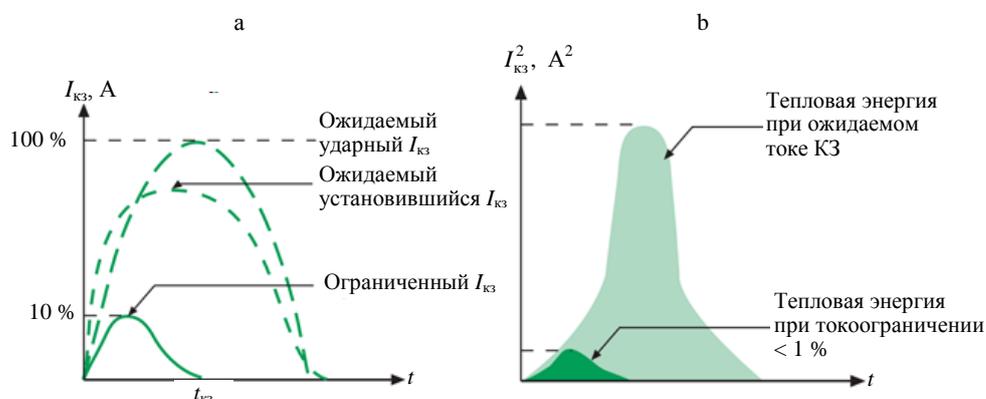


Рис. 1. Графическая зависимость, характеризующая ограничение ударного тока короткого замыкания (а) и снижение выделяемой тепловой энергии (б) [2]

Fig. 1. Surge short circuit current (a) and thermal energy (b) limitation characteristic curve [2]

Токоограничивающий автоматический выключатель в пределах заданного диапазона тока предотвращает достижение сквозным током ожидаемого пикового значения и ограничивает сквозную энергию значением, меньшим, чем сквозная энергия волны полупериода симметричного ожидаемого тока [3]. Токоограничение автоматического выключателя обеспечивается за счет конструкции его полюсов. При различном направлении

протекания электрического тока в двух параллельных проводниках возникающие электродинамические усилия отталкивают их друг от друга. Конструкция полюса, приведенная на рис. 2, позволяет полностью или частично разомкнуть контакты выключателя быстрее, чем передаются усилия от электромагнитного расцепителя через привод. Величина электродинамических усилий зависит от квадрата тока, следствием чего является высокая эффективность метода при больших токах КЗ.

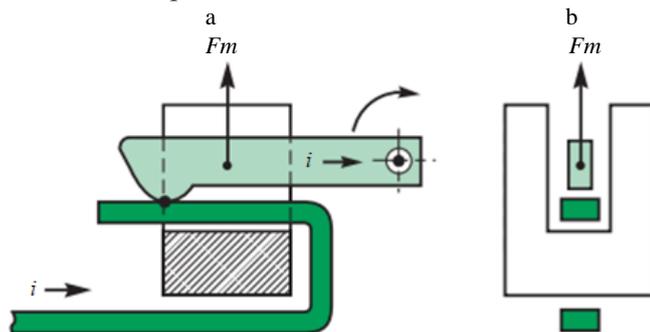


Рис. 2. Конструкция полюса автоматического выключателя с реализацией отталкивания контактов во фронтальной (а) и профильной (б) проекциях [2]: i – протекающий ток; F_m – вызванное электродинамическое усилие

Fig. 2. Design of the circuit breaker pole with implementation of contact repulsion in frontal (a) and profile (b) projections [2]: i – flowing current; F_m – induced electrodynamic force

Токоограничение предохранителя обеспечивается за счет конструктивных особенностей его плавкой вставки, которая в процессе и в результате срабатывания в установленном диапазоне токов ограничивает ток до более низкого значения, чем пиковое значение ожидаемого тока [4]. К особенностям конструкции токоограничивающих предохранителей относятся металлургический эффект, наличие перешейков меньшего сечения, установленных параллельно плавким вставкам и кварцевого песка.

Металлургический эффект – способность растворять некоторые тугоплавкие металлы в легкоплавких с изменением их физических параметров, в частности удельного сопротивления. Повышение сопротивления плавкой вставки приводит к увеличению выделяющейся в предохранителе энергии (так как количество выделяющейся теплоты пропорционально активному сопротивлению плавкой вставки) и повышению температуры вставки, что ускоряет ее плавление и разрушение. Чаще всего в качестве менее тугоплавкого металла применяют олово. Установка шариков легкоплавкого металла в перешейках меньшего сечения увеличивает сопротивление данного участка плавкой вставки и ускоряет происходящие при металлургическом эффекте процессы.

Наличие установленных параллельно плавким вставкам приводит к тому, что при разрушении одной из них величина тока, протекающего по остальным, увеличивается, выделяющаяся в предохранителе энергия тоже увеличивается, что приводит к повышению температуры плавкой вставки, плавлению и разрушению.

Наличие кварцевого песка способствует более интенсивному охлаждению электрической дуги. Как следствие, напряжение ее горения превышает напряжение сети, и уже до естественного прохождения тока через нуль электрическая дуга гаснет.

Конструкция токоограничивающей плавкой вставки изображена на рис. 3.

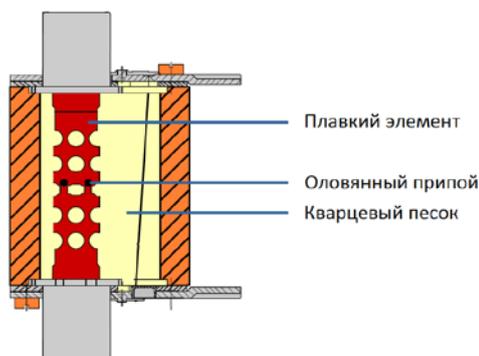


Рис. 3. Конструкция токоограничивающего предохранителя [5]

Fig. 3. Current limitation fuse design [5]

Полное время отключения автоматического выключателя (время от момента КЗ до момента погасания электрической дуги) и значение протекающего тока КЗ определяются таким параметром, как класс токоограничения. Выделяют три класса токоограничения автоматических выключателей, каждый из которых характеризует максимальную величину термического импульса КЗ, выделяемого в оборудовании при протекании тока КЗ. Для первого класса токоограничения максимальная допустимая величина термического импульса не установлена стандартом, а для третьего имеет минимальное значение. Максимальные допустимые термические импульсы для автоматических выключателей с различными классами токоограничения, номинальными токами и характеристиками срабатывания приведены в стандарте [6]. Допустимые в [6] значения термического импульса для автоматических выключателей с номинальным током до 16 А и обратнозависимыми характеристиками категорий В и С включительно представлены в табл. 1.

Таблица 1

Допустимые значения термического импульса I^2t , $A^2 \cdot s$, для автоматических выключателей с номинальным током до 16 А включительно

Permissible values of the thermal pulse I^2t , $A^2 \cdot s$, for circuit breakers with rated current up to and including 16 A

Отключающая способность, А	Термический импульс при классе токоограничения				
	1	2		3	
	Для характеристики				
	В, С	В	С	В	С
3000	Не ограничен	31000	37000	15000	18000
4500		60000	75000	25000	30000
6000		100000	120000	35000	42000
10000		240000	290000	70000	84000

Однако ввиду того, что ток КЗ никогда не должен превышать отключающую способность выключателя (которая является максимальным допустимым сквозным током автоматического выключателя), для определения величины ограниченного тока КЗ и термического импульса при известном расчетном значении тока КЗ до токоограничения принято пользоваться характеристиками токоограничения оборудования. Также данные характеристики учитывают различие между требованиями стандарта [6] и фактическими параметрами оборудования.

Характеристики токоограничения предохранителей серии ППН приведены на рис. 4, ограничения ударного тока КЗ и тепловой энергии КЗ модульных автоматических выключателей Schneider Electric iC60N – на рис. 5, 6 соответственно. Ввиду распространенности модульных выключателей и предохранителей схожей конструкции стоит отметить, что большое количество применяемых защитных аппаратов на номинальные токи до 63 А имеют функцию токоограничения.

Из рис. 4–6 можно определить, что наибольшее ограничение пропускаемой энергии и ударного тока в процентном соотношении к значению токоограничения в случае применения токоограничивающих предохранителей и автоматических выключателей достигается при значениях тока КЗ, близких к отключающей способности аппарата защиты.

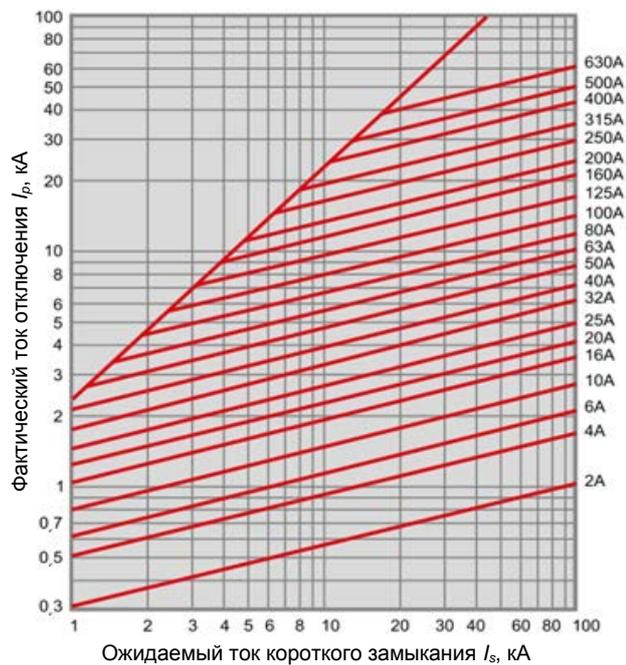


Рис. 4. Токоограничение периодической составляющей тока короткого замыкания предохранителей ППН [7]

Fig. 4. Characteristic of limiting the periodic component of the short-circuit current of the PPN fuses [7]

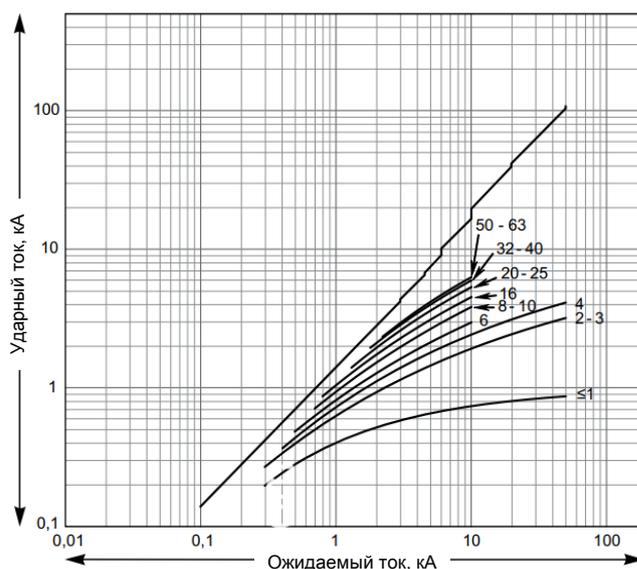


Рис. 5. Ограничение ударного тока короткого замыкания автоматического выключателя Schneider Electric iC60N (3P, категория C, класс 3) [8]

Fig. 5. Limiting the short circuit surge current of the Schneider Electric iC60N circuit breaker (3P, category C, class 3) [8]

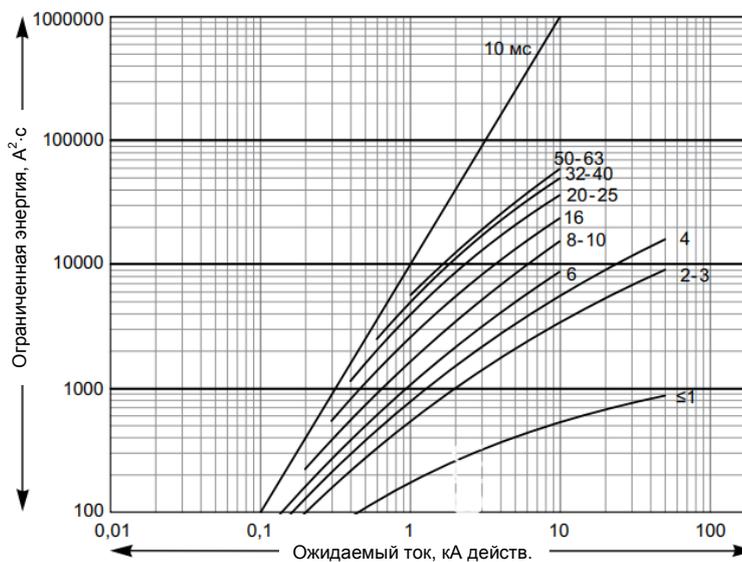


Рис. 6. Ограничение тепловой энергии короткого замыкания автоматического выключателя Schneider Electric iC60N (3P, категория C, класс 3) [8]

Fig. 6. Limiting the short circuit thermal energy of the Schneider Electric iC60N circuit breaker (3P, category C, class 3) [8]

Данный эффект объясняется следующим образом. Эффективность токоограничения характеризуется тем, что зависимость тепловой энергии, вы-

деляемой в оборудовании при протекании тока КЗ, от величин тока КЗ, а также зависимость электродинамических усилий при протекании тока КЗ от величин тока КЗ квадратичны ($W = I^2 R t$; $F = c i^2$, где W – электроэнергия, расходуемая на нагрев элемента электрической сети, кВт·ч; I – действующее значение тока КЗ, А; R – активное сопротивление элемента электрической сети, Ом; F – электродинамическое усилие, Н; c – расчетный коэффициент; i – ударный ток КЗ, А. Следовательно, при уменьшении тока КЗ на 20 % происходит снижение электродинамического и термического воздействий на 36 %, а при уменьшении тока КЗ на 50 % – снижение электродинамического и термического воздействий на 75 %, что говорит об эффективности результатов токоограничения при высоких значениях токов КЗ. В то же время применение токоограничивающих защитных аппаратов приводит к увеличению пределов селективности выключателей и помогает добиться полной селективности в режиме КЗ.

При наличии нижестоящего аппарата защиты с функцией ограничения тока КЗ происходит ограничение термического импульса, выделяющегося в вышестоящем выключателе без функции токоограничения, что, в свою очередь, приводит к снижению времени срабатывания при КЗ на смежном участке и увеличению пределов селективности. В случае если вышестоящий аппарат защиты также имеет функцию токоограничения, обеспечение селективности при протекании значительной величины тока КЗ осуществляется согласно данным производителя.

Как отмечалось ранее, количество выделившейся тепловой энергии в защитном аппарате и защищаемой электроустановке зависит от квадрата тока ($W = I^2 R t$). Для определения количества выделившейся энергии используется понятие термического импульса, или интеграла Джоуля ($B_k = It$). Интеграл Джоуля – условная величина, характеризующая тепловое действие тока КЗ на рассматриваемый элемент электроустановки, численно равная интегралу от квадрата тока КЗ по времени в пределах от начального момента КЗ до момента его отключения [9].

Интеграл Джоуля как характеристика защитного аппарата определяет количество энергии, которую он способен пропустить через себя до момента отключения тока КЗ [10]. Ввиду того, что при малом времени отключения, согласно уравнению теплового баланса, теплообменом с окружающей средой можно пренебречь, вся электрическая энергия, выделяющаяся в защитном аппарате, расходуется на его нагрев (нагрев плавкой вставки предохранителя или теплового расцепителя автоматического выключателя), что приводит к отключению аппарата. Таким образом, селективность защитных аппаратов обеспечивается при условии, что энергия, выделяющаяся при протекании тока КЗ, должна приводить к отключению нижестоящего аппарата защиты, а выделяющаяся за время срабатывания нижестоящего аппарата защиты и время гашения электрической дуги в вышестоящем аппарате энергия не должна приводить к отключению вышестоящего аппарата защиты. Такой метод называется энергетической селективностью.

Данные производителя, по которым можно определить, селективны ли два токоограничивающих защитных аппарата, приводятся в табличной [11] или графической форме. Графики энергетической селективности показывают величины термических импульсов: приводящих к срабатыванию аппарата защиты и выделяющихся в аппарате за полное время отключения. Величина ограниченного термического импульса (тепловой энергии) для выбора оборудования с учетом токоограничения также может определяться по указанным графикам. Аналогично график энергетической селективности может быть получен из характеристики ограничения тепловой энергии КЗ.

График определения энергетической селективности плавких вставок gG предохранителей АВВ приведен на рис. 7, график ее обеспечения представлен в [11, 12].

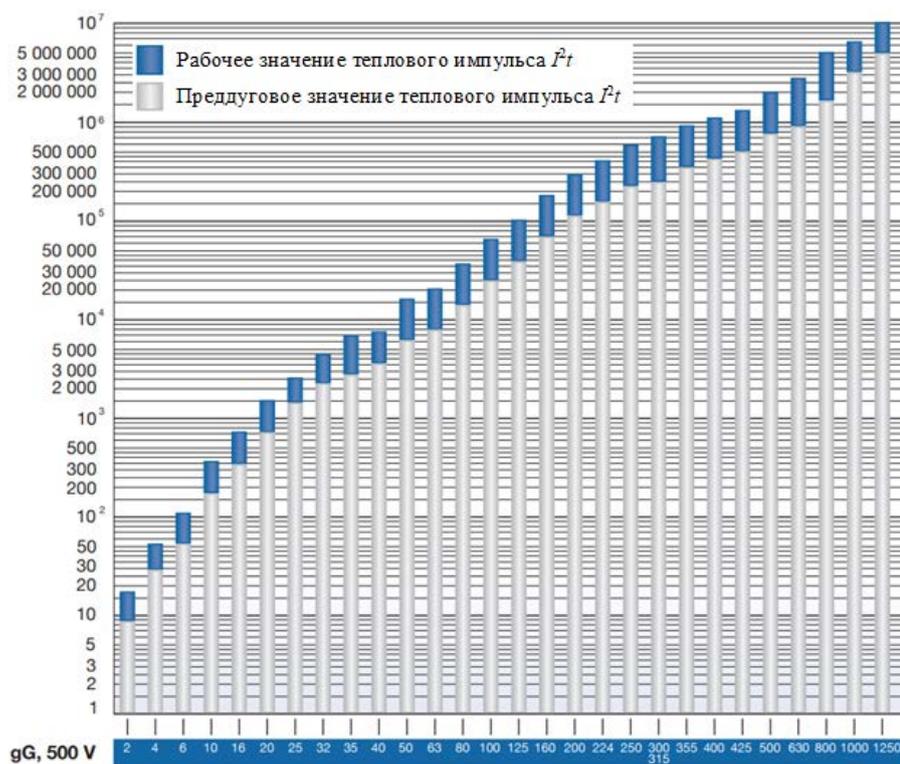


Рис. 7. График определения энергетической селективности плавких вставок gG предохранителей АВВ [12]

Fig. 7. Graph of determining energy selectivity of gG fuse links of АВВ fuses [12]

ВЫВОДЫ

1. Применение токоограничивающего оборудования в сетях с высоким значением тока короткого замыкания позволяет существенно снизить стоимость сетей электроснабжения и распределительных устройств при питании потребителей малой мощности.

2. Использование различных методов токоограничения в сетях с низкими значениями токов короткого замыкания не только влечет за собой неоправданные дополнительные затраты, но и может привести к уменьшению чувствительности автоматических выключателей к току короткого замыкания в конце защищаемого участка до значения ниже допустимого техническими нормативными правовыми актами.

3. Наиболее действенным методом токоограничения в сетях до 1 кВ является применение токоограничивающих защитных аппаратов.

4. Ограничение тока короткого замыкания позволяет повысить эффективность использования мини-энергокомплексов [13].

5. Описанные мероприятия следует проводить на этапе проектирования ввиду нерациональности замены оборудования, не выработавшего свой ресурс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок / 6-е изд., перераб. и доп., с изм. М.: Энергоатомиздат, 1986. 648 с.
2. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 4. Координация защит низкого напряжения [Электронный ресурс]. Schneider Electric, 2006. Режим доступа: https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/TechLibrary/Vipusk4-Koordinacia_zashit.pdf.
3. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели: ГОСТ ИЕС 60947-2–2014. Введ. 01.10.2021. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. 128 с.
4. Предохранители плавкие низковольтные. Часть 1. Общие требования: ГОСТ ИЕС60269-1–2016. Введ. 01.03.2019. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. 68 с.
5. Принцип работы предохранителя [Электронный ресурс] // КЭАЗ. 2016. Режим доступа: <https://keaz.ru/company/press-center/blog/2016/864-princip-raboti-i-ustroystvo-predohranitelya>. Дата доступа: 20.05.2021.
6. Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Автоматические выключатели для переменного тока: ГОСТ ИЕС 60898-1–2020. Введ. 01.10.2021. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2020. 124 с.
7. Электротехническая продукция для профессионалов. Мастер каталог № 29, 2020 [Электронный ресурс] / ЕКФ. 2020. Режим доступа: <https://ekfgroup.com/uploads/pos-articles/2020-05/master-katalog-29.pdf>.
8. Acti 9. Эффективность, достойная Вас, 2019: технический каталог [Электронный ресурс] / Schneider Electric. 2019. Режим доступа: <https://shop.idelectro.ru/upload/docs/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%20Acti9%202019.pdf>.
9. Короткие замыкания в электроустановках: ГОСТ 26522–85. Введ. 01.07.1986. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1985. 20 с.
10. Низковольтное оборудование. Защита на предохранителях. Выключатели нагрузки с предохранителями [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://library.e.abb.com/public/3b93e50521914de6b2d24fd13c6892af/Fusegear.pdf>. Дата доступа: 03.06.2021.
11. Капустинский, А. Ю. Повышение чувствительности защит в электрических сетях до 1 кВ путем применения микропроцессорных и полупроводниковых расцепителей / А. Ю. Капустинский, С. В. Константинова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 393–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407>.

12. Низковольтное оборудование. Выключатели нагрузки до 4000 А. Технический каталог [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://library.e.abb.com/public/7d10d20cd44acd254825794b0039535d9CND00000000346-4-5.pdf>. Дата доступа: 03.06.2021.
 13. Константинова, С. В. Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме / С. В. Константинова, А. Ю. Капустинский, Т. М. Ярошевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50>.
- Поступила 30.06.2020 Подписана в печать 06.09.2021 Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. *Rules for the Arrangement of Electrical Installations. The Sixth Edition, Revised and Supplemented, with Changes*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 648 (in Russian).
2. Schneider Electric (2006) Schneider Electric Technical Collection. Iss. 4. *Coordination of Low Voltage Protections*. Available at: https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/TechLibrary/Vipusk4-Koordinacia_zashit.pdf (in Russian).
3. State Standard IEC 60947-2–2014. *Low-Voltage Distribution and Control Equipment. Part 2. Circuit Breakers*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2014. 128 (in Russian).
4. State Standard IEC 60269-1–2016. *Low-Voltage Fuses. Part 1. General Requirements*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2016. 68 (in Russian).
5. The Principle of Operation of the Fuse. *Kursk Electrical Equipment Plant*. 2016. Available at: <https://keaz.ru/company/press-center/blog/2016/864-princip-raboti-i-ustroystvo-predohranitelya> (Accessed 20 May 2021) (in Russian).
6. State Standard IEC 60898-1–2020. *Small-Sized Electrical Equipment. Circuit Breakers for Protection Against Overcurrents for Household and Similar Purposes. Part 1. Circuit Breakers for Alternating Current*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2020. 124 (in Russian).
7. EKF (2020) *Electrical Products for Professionals: Master Catalog No. 29, 2020*. Available at: <https://ekfgroup.com/uploads/pos-articles/2020-05/master-katalog-29.pdf> (in Russian).
8. Schneider Electric (2019) *Acti 9. Efficiency Worthy of You*. Available at: <https://shop.idelectro.ru/upload/docs/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%20Acti9%202019.pdf> (in Russian).
9. State Standard 26522–85. *Short Circuits in Electrical Installations*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1985. 20 (in Russian).
10. *Low-Voltage Equipment. Protection on Fuses. Load Switches with Fuses* [Electronic Resource]. Available at: <https://library.e.abb.com/public/3b93e50521914de6b2d24fd13c6892af/Fuse-gear.pdf> (Accessed 3 June 2021) (in Russian).
11. Kapustinski A. Yu., Kanstantsinava S. V. (2021) Increasing the Sensitivity of Protections in Electrical Networks up to 1 kV by Using Microprocessor and Semiconductor Release Tripping Devices. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 393–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407> (in Russian).
12. *Low-Voltage Equipment. Load Switches up to 4000 A. Technical Catalog*. Available at: https://www.abn.ru/files/abb/Catalogue_Switches.pdf (Accessed 3 June 2021) (in Russian).
13. Konstantinova S. V., Kapustinskii A. Yu., Yaroshevich T. M. (2021) Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50> (in Russian).

Received: 30 June 2020 Accepted: 6 September 2021 Published online: 30 November 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-505-516>

УДК 621.313

Оптимизация параметров вторичного элемента односторонних линейных асинхронных электродвигателей с использованием генетического алгоритма

В. А. Прахт¹⁾, В. В. Гоман²⁾, А. С. Парамонов¹⁾

¹⁾Уральский федеральный университет (Екатеринбург, Российская Федерация),

²⁾Нижнетагильский технологический институт Уральского федерального университета
(Нижний Тагил, Российская Федерация)

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

Реферат. Рассмотрено применение генетического алгоритма для проектирования линейных асинхронных электродвигателей, проведено его сравнение с классическими методами. Представлены результаты решения оптимизационной задачи для двух конструкций: лабораторного линейного асинхронного электродвигателя на базе трехфазного индуктора SL-5-100 и тягового одностороннего линейного асинхронного электродвигателя городской транспортной системы. Критерий оптимальности включал максимизацию коэффициентов мощности и полезного действия, а также жесткости механической характеристики при обеспечении пускового тягового усилия не менее заданного значения. Описаны результаты оптимизации таких параметров вторичного элемента, как ширина и толщина проводящей полосы, толщина магнитопровода. Актуальность задачи оптимизации параметров вторичного элемента при неизменных параметрах индуктора обусловлена тем, что один и тот же индуктор может использоваться для построения различных конструкций, при этом вторичный элемент создается под каждое конкретное применение и интегрируется непосредственно в рабочий орган механизма либо является приводимым в движение изделием. Для расчета тяговых и энергетических характеристик линейных асинхронных электродвигателей использовалась электромагнитная модель на основе детализированных схем замещения, учитывающая продольный и поперечный краевые эффекты и обеспечивающая время расчета для одного набора параметров около 1 с. В соответствии с данной моделью электродвигатель сводится к совокупности трех детализированных схем замещения: магнитной цепи, первичной и вторичной электрических цепей. Результатом оптимизации указанных электродвигателей стало повышение коэффициента полезного действия на 1,6 и 1,4 % соответственно, коэффициента мощности – на 0,9 и 0,2 %, увеличение жесткости тяговых характеристик и пускового тягового усилия.

Ключевые слова: оптимизация, линейный асинхронный электродвигатель, проектирование, генетический алгоритм, вторичный элемент, тяговое усилие, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, критерий оптимальности, детализированные электрические и магнитные схемы замещения

Для цитирования: Прахт, В. А. Оптимизация параметров вторичного элемента односторонних линейных асинхронных электродвигателей с использованием генетического алгоритма / В. А. Прахт, В. В. Гоман, А. С. Парамонов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 6. С. 505–516. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-505-516>

Адрес для переписки

Практ Владимир Алексеевич
Уральский федеральный университет
ул. Мира, 19,
620002, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Тел.: +7 343 375-45-07
va.praht@urfu.ru

Address for correspondence

Prakht Vladimir A.
Ural Federal University
19, Mira str.,
620002, Yekaterinburg, Russian Federation
Tel.: +7 343 375-45-07
va.praht@urfu.ru

Design Optimization of Secondary Element of Single-Sided Linear Induction Motors Using a Genetic Algorithm

V. A. Prakht¹⁾, V. V. Goman²⁾, A. S. Paramonov¹⁾

¹⁾Ural Federal University (Yekaterinburg, Russian Federation),

²⁾Nizhny Tagil Technological Institute of Ural Federal University (Nizhny Tagil, Russian Federation)

Abstract. The article focuses on the use of genetic algorithms for the design of linear induction motors. Comparison of genetic algorithm with classical methods in the context of electrical machines designing has been carried out. The results of solving an optimization problem for two designs are presented, viz. a laboratory linear induction electric motor based on a three-phase SL-5-100 inductor and a traction single-sided linear induction electric motor of an urban transport system. The optimality criterion included maximizing the power factor and efficiency, as well as the rigidity of the mechanical characteristic while ensuring a starting traction force of at least a set value. The results of optimization of such parameters of the secondary element as the width and thickness of the conductive strip as well as the thickness of the magnetic circuit are described. The relevance of the problem of optimizing the parameters of the secondary element with unchanged parameters of the inductor is due to the fact that the same inductor can be used to build various structures, while the secondary element is created for each specific application and integrated directly into the working body of the mechanism or is a driven product. To calculate the traction and energy characteristics of linear induction electric motors, an electromagnetic model based on detailed equivalent circuits was used, taking into account longitudinal and transverse edge effects and providing a calculation time for one set of parameters of about 1 s. In accordance with this model, the electric motor is reduced to a set of three detailed equivalent circuits: a magnetic circuit, primary and secondary electrical circuits. The result of the optimization of these electric motors was an increase in the efficiency by 1.6 and 1.4 %, respectively, an increase in the power factor by 0.9 and 0.2 %, and an increase in the rigidity of traction characteristics and starting traction force.

Keywords: optimization, linear induction motor, design, genetic algorithm, secondary element, tractive effort, efficiency, power factor, optimality criterion, detailed electrical and magnetic equivalent circuits

For citation: Prakht V. A., Goman V. V., Paramonov A. S. (2021) Design Optimization of Secondary Element of Single-Sided Linear Induction Motors Using a Genetic Algorithm. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 505–516. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-505-516> (in Russian)

Введение

Линейные асинхронные двигатели (ЛАД), широко применяемые в транспортных системах, имеют различные конструкции: односторонние, двусторонние, цилиндрические (трубчатые) и др. От вращающихся асинхронных двигателей ЛАД отличаются характером протекания электромагнитных процессов вследствие наличия продольного и поперечного краевых эффектов. Данные явления хорошо исследованы и описаны в [1–3]. Вопросы изучения характеристик тяговых электродвигателей актуальны в связи с широким развитием электрических транспортных систем [4, 5].

Поскольку методики проектирования вращающихся электродвигателей [6] и ЛАД отличаются, множество работ посвящено изучению влияния отдельных факторов на характеристики ЛАД [5, 7], оптимизации ЛАД

на основе различных моделей [8–11], в частности с использованием генетического алгоритма (ГА) [12–14]. Известно применение аппарата схем замещения для анализа электродвигателей и генераторов, в том числе линейного (возвратно-поступательного) действия [15, 16].

Наряду с методом конечных элементов (МКЭ) для исследования ЛАД и генераторов линейного действия широко распространен подход на основе схем замещения [17–22]. В данной статье для оптимизационного расчета применена модель, в соответствии с которой ЛАД сводится к совокупности трех детализированных схем замещения: магнитной цепи, первичной и вторичной электрических цепей [15, 16]. Электромагнитная модель может быть дополнена тепловой моделью, также основанной на детализированных тепловых схемах замещения [23]. Расчет характеристик ЛАД реализован в среде MATLAB. Одна итерация расчета модели на основе схем замещения занимает около 1 с, в отличие от МКЭ-моделей, расчет по которым длится полминуты или более [24].

Методы и подходы

Задача оптимального проектирования состоит в том, чтобы из множества реально возможных вариантов выбрать один наилучший по заданному критерию. Преимущество конкретного варианта определяется количественной оценкой наиболее важной характеристики (группы характеристик) электрической машины, т. е. критерием оптимальности [25]. Этот критерий должен принимать максимальное (минимальное) возможное значение при заданных ограничениях. Как правило, производятся максимизация КПД, тягового усилия (вращающего момента), выходной мощности и минимизация массы и габаритов, а для ряда видов электродвигателей актуальна также минимизация удерживающего момента и пульсаций момента [24].

При проектировании ЛАД целевые функции оптимизации, как правило, не обладают явной зависимостью от конструктивных размеров и других параметров. Кроме того, некоторые параметры могут иметь спектр дискретных значений. Наиболее распространенными в задачах целочисленного программирования, когда параметры оптимизации варьируются дискретно, являются методы динамического программирования и поиска глобального экстремума. Однако при большом числе параметров оптимизации пространство поиска возрастает настолько, что становится существенной проблема времени вычислений.

Таким образом, основные трудности применения классических методов оптимизации нелинейной функции, которой в общем случае является модель ЛАД [13], связаны с проблемами отыскания глобального экстремума и длительностью времени поиска оптимума при значительном числе параметров оптимизации [25]. Например, метод Нелдера – Мида [26], согласно опыту его применения для проектирования электродвигателей и генерато-

ров с постоянными магнитами [27–29], склонен к «застреванию» в локальных экстремумах и не эффективен при наличии более семи варьируемых параметров. Однако достоинством метода является относительно быстрое получение результата.

В статье исследована возможность применения ГА для оптимизации конструкции ЛАД с использованием модели на основе детализированных схем замещения [15, 16]. Генетический алгоритм – это метод решения задач оптимизации, основанный на естественном отборе, т. е. представляющий собой аналогию биологического процесса эволюции [30]. На каждом шаге ГА осуществляется вероятностный отбор неких индивидуальностей (возможных решений задачи) из текущего родительского поколения и производится последующее дочернее поколение. Через последовательный отбор поколений проходит эволюция продвижения к оптимальному решению [30]. Упрощенная блок-схема ГА [30] показана на рис. 1.

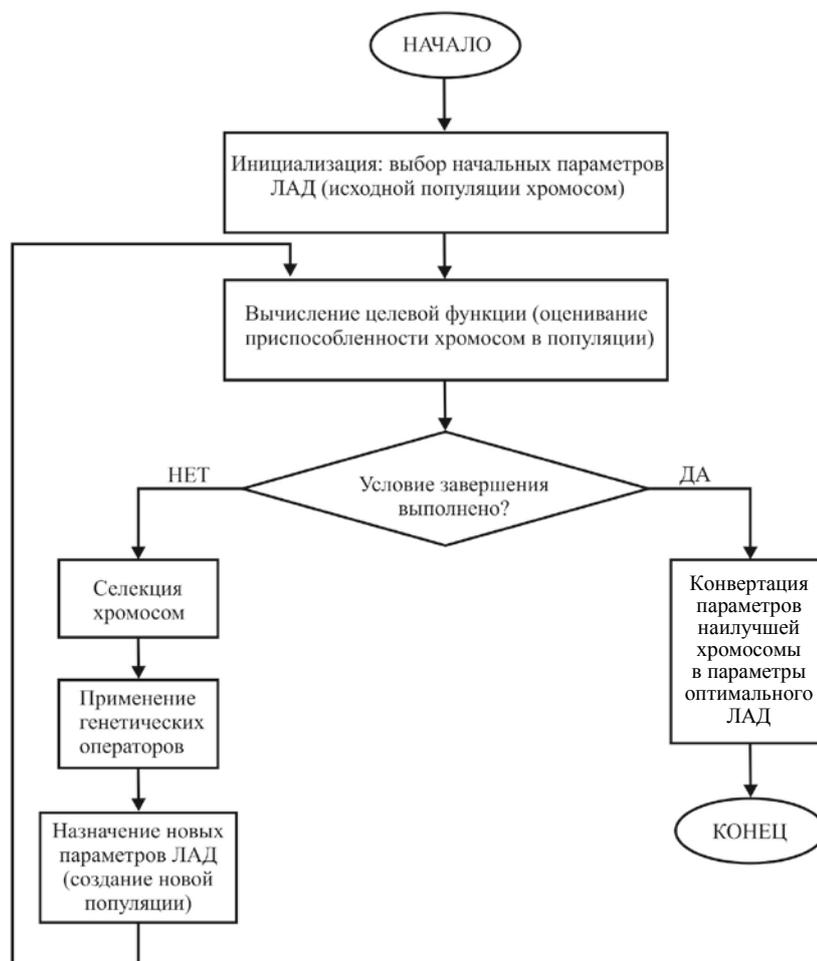


Рис. 1. Упрощенная блок-схема классического генетического алгоритма

Fig. 1. A simplified flowchart of classical genetic algorithm

Критерий оптимальности задавался таким образом, чтобы при пусковом усилии не ниже, чем у ЛАД с исходным набором параметров для номинального режима, производилась максимизация коэффициентов мощности и полезного действия, а также жесткости механической характеристики.

Целевая функция предполагает минимизацию разности между желаемым $F_{\text{ном}}^*$ и исходным $F_{\text{ном}}$ номинальными тяговыми усилиями, что обеспечивает повышение жесткости механической характеристики и минимизацию разности между желаемым F_{start}^* и исходным F_{start} пусковыми тяговыми усилиями, идеальными единичными значениями и исходными коэффициентами мощности $PF_{\text{ном}}$ и КПД $\eta_{\text{ном}}$:

$$F = k_1(F_{\text{ном}}^* - F_{\text{ном}}) + k_2(F_{\text{start}}^* - F_{\text{start}}) + k_3(1 - PF_{\text{ном}}) + k_4(1 - \eta_{\text{ном}}), \quad (1)$$

где $k_{1..4}$ – весовые коэффициенты каждого критерия.

Расчет параметров целевой функции (1) проводили на основе системы уравнений математической модели ЛАД [15, 16]:

$$\begin{cases} U = Z^f I^f + j\omega w K_E \Phi_1; \\ R_{11}\Phi_1 - R_{12}\Phi_2 = w K_{PR} I^f; \\ -R_{12}\Phi_1 + R_{22}\Phi_2 = I^c; \\ Z^c I^c = -V^c \Phi_2; \\ F_T - F_c = M \frac{dv}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где U – вектор линейных напряжений питающей сети; Z^f – матрица комплексных сопротивлений фаз индуктора, $Z^f = R^f + j\omega L^f$; R^f – активное сопротивление фазы индуктора; L^f – индуктивность фазы индуктора, не учтенная в схеме замещения магнитной цепи; j – мнимая единица; ω – угловая частота переменного тока; I^f – вектор фазных токов индуктора; w – число витков в пазу; K_E – матрица приведения пазовых ЭДС индуктора к контурным ЭДС; Φ_1, Φ_2 – векторы магнитных потоков ярм индуктора и вторичного элемента; R_{11}, R_{12}, R_{22} – матрицы магнитных сопротивлений; K_{PR} – матрица приведения фазных токов индуктора к пазовым; I^c – вектор токов приведенной электрической цепи вторичного элемента; Z^c – матрица сопротивлений приведенной электрической цепи вторичного элемента; V^c – то же формирования ЭДС, наводимых в условных контурах вторичного элемента; F_T – тяговое усилие; F_c – сумма сил сопротивления; M – масса подвижной части ЛАД; v – скорость перемещения подвижной части [21, 22].

Результаты и их обсуждение

Объекты исследования – лабораторный ЛАД на базе трехфазного индуктора SL-5-100 (рис. 2а) и тяговый односторонний ЛАД для городской транспортной системы, индуктор которого показан на (рис. 2б). Основные параметры обоих ЛАД приведены в табл. 1.

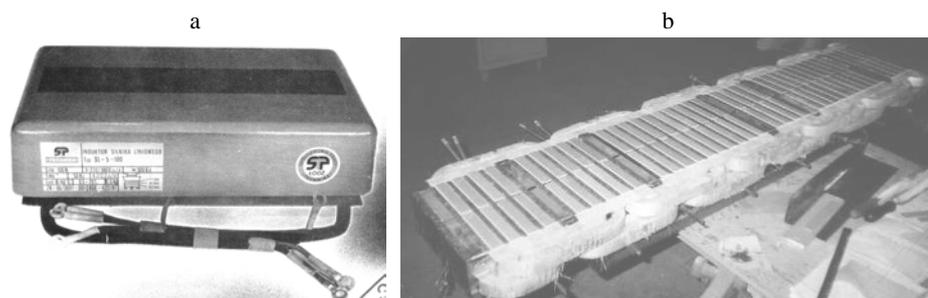


Рис. 2. Индукторы исследуемых линейных асинхронных двигателей:
а – SL-5-100; б – тягового двигателя

Fig. 2. Inductors of the linear induction motors under study:
a – of the SL-5-100; b – of a traction linear induction motor

Особенность линейного асинхронного электродвигателя в том, что он создается для конкретного механизма и хорошо с ним интегрируется, т. е., по сути, является мехатронным модулем. В частном случае вторичным элементом может быть приводимое в движение изделие или непосредственно рабочий орган механизма. По этой причине рассмотрена задача оптимизации параметров вторичного элемента при неизменных параметрах индуктора. В качестве начального приближения использовали параметры вторичного элемента, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры исследуемых линейных асинхронных двигателей
Specification of the linear induction motors under study

Наименование параметра	Значение для двигателя	
	лабораторного с индуктором SL-5-100	тягового для транспортной системы
1	2	3
Частота питания, Гц	50	23,2
Номинальное фазное напряжение, В	220	240
Номинальный фазный ток, А	7,1	270
Номинальное тяговое усилие, Н	100	2832
Максимальное тяговое усилие, Н	166	5500
Синхронная скорость, м/с	5	10
Число полюсов	4	8
Число пазов	12	50

Окончание табл. 1

1	2	3
Число витков в пазу	420	14
Ширина магнитопровода индуктора, мм	50	240
Высота магнитопровода индуктора, мм	80	110
Высота ярма магнитопровода индуктора, мм	35	40
Длина магнитопровода индуктора, мм	200	1740
Зубцовое деление, мм	16,7	35
Ширина проводящей полосы вторичного элемента, мм	50	240
Толщина проводящей полосы вторичного элемента, мм	3	6
Ширина магнитопровода вторичного элемента, мм	50	240
Толщина магнитопровода вторичного элемента, мм	5	20,7
Воздушный зазор, мм	1	10

Варьируемые параметры вторичного элемента и диапазоны их значений для ЛАД с индуктором SL-5-100 приведены в табл. 2, для тягового ЛАД транспортной системы – в табл. 3.

Таблица 2

**Варьируемые параметры вторичного элемента
для линейного асинхронного двигателя с индуктором SL-5-100**

**Variable parameters of the secondary element
for a linear induction motor with a SL-5-100 inductor**

Наименование параметра вторичного элемента	Значение, мм			Шаг, мм
	min	max	оптимизи- рованное	
Ширина проводящей полосы	35,0	65,0	54,0	1,0
Толщина проводящей полосы	2,1	3,9	3,2	0,1
Толщина магнитопровода	3,5	6,5	5,5	0,1

Таблица 3

**Варьируемые параметры вторичного элемента
для тягового линейного асинхронного двигателя транспортной системы**

**Variable parameters of the secondary element
for a traction linear induction motor of transportation system**

Наименование параметра вторичного элемента	Значение, мм			Шаг, мм
	min	max	оптимизи- рованное	
Ширина проводящей полосы	168,0	312,0	258,0	1,0
Толщина проводящей полосы	4,2	7,8	6,4	0,1
Толщина магнитопровода	14,5	26,9	22,8	0,1

Результаты, полученные в процессе оптимизации для ЛАД с индуктором SL-5-100, представлены на рис. 3, 4а. По сравнению с исходной конструкцией ЛАД коэффициент мощности увеличился на 0,9 %, номинальный КПД – на 1,6 %. Кроме того, удалось получить более жесткую механическую характеристику при большем пусковом усилии и улучшенных энергетических показателях (рис. 4а).

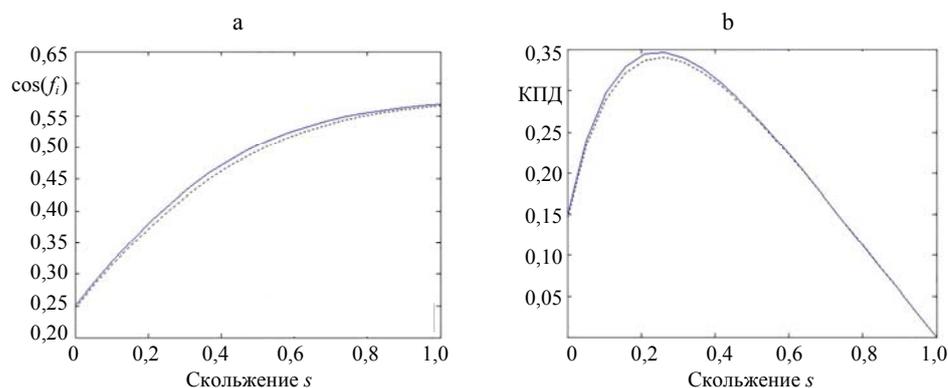


Рис. 3. Зависимость коэффициентов мощности (а) и полезного действия (б) от скольжения для линейного асинхронного двигателя с индуктором SL-5-100:

— спроектированный двигатель; — исходный двигатель

Fig. 3. Dependence of power coefficients (a) and efficiency (b) on sliding for a linear SL-5-100 induction motor

— the designed motor; — the original motor

Результаты оптимизации тягового ЛАД показаны на рис. 4б, 5.

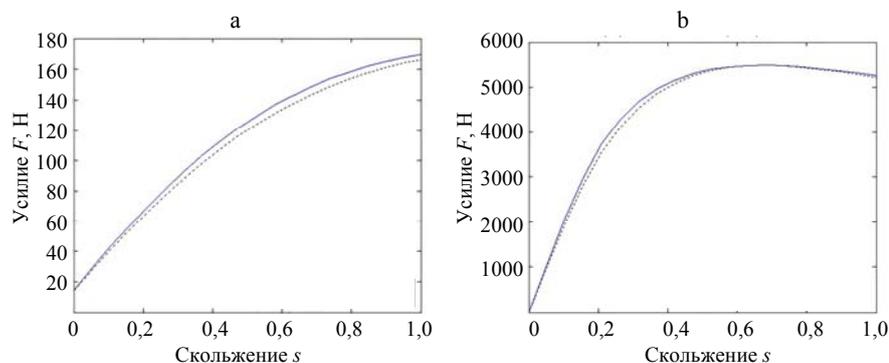


Рис. 4. Механическая характеристика линейного асинхронного двигателя:

а – с индуктором SL-5-100; б – тягового;

— спроектированный двигатель; — исходный двигатель

Fig. 4. Mechanical characteristics of a linear induction motor:

а – with a SL-5-100 inductor; б – of a traction one;

— the designed motor; — the original motor

По сравнению с исходной конструкцией ЛАД номинальный коэффициент мощности увеличился лишь на 0,2 %, номинальный КПД – на 1,4 %. Удалось получить более жесткую механическую характеристику при

приблизительно том же пусковом усилии и тех же улучшенных энергетических показателях (рис. 4b).

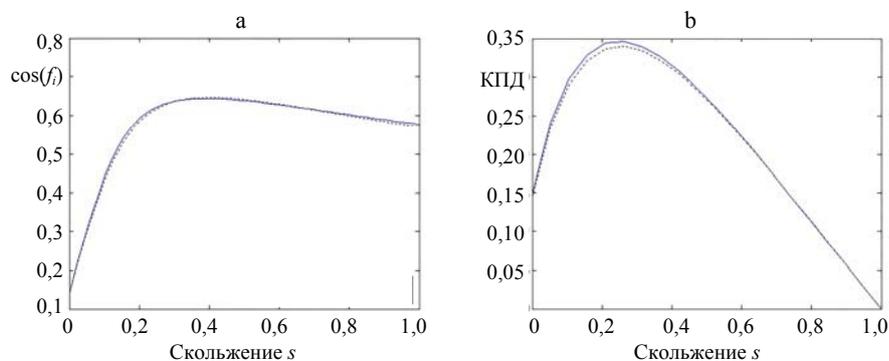


Рис. 5. Зависимость коэффициентов мощности (а) и полезного действия (б) от скольжения для тягового линейного асинхронного двигателя:

— спроектированный двигатель; — исходный двигатель

Fig. 5. Dependence of power factor (a) and efficiency (b) on slip for traction linear induction motor:

— the designed motor; — the original motor

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена оптимизация линейных асинхронных двигателей с помощью генетического алгоритма. Использована электромагнитная модель двигателя на базе детализированных схем замещения. Для двигателя лабораторной установки и тягового двигателя транспортной системы описаны результаты оптимизации параметров вторичного элемента, в результате чего улучшены их энергетические и механические характеристики.

2. Для линейного асинхронного двигателя на базе индуктора SL-5-100 определены значения ширины (54,0 мм) и толщины (3,2 мм) проводящей полосы, толщины магнитопровода (5,5 мм), при которых достигаются максимальные коэффициенты полезного действия и мощности.

3. Для тягового двигателя транспортной системы определены следующие оптимальные значения параметров вторичного элемента: ширина (258,0 мм) и толщина (6,4 мм) проводящей полосы, толщина магнитопровода (22,8 мм).

4. Найденные оптимальные параметры позволяют обеспечить повышение жесткости тяговых характеристик и пускового тягового усилия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский, О. Н. Линейные асинхронные двигатели / О. Н. Веселовский, А. Ю. Коняев, Ф. Н. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 255 с.
2. Yamamura, S. Theory of Linear Induction Motors / S. Yamamura. New York: Halsted, 1979. 180 p.
3. Gieras, J. F. Linear Induction Drives / J. F. Gieras. London: Oxford Univ. Press, 1994. 320 p.
4. Фьюнг Ле, Нго. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромотоцикла / Нго Фьюнг Ле, Г. И. Гульков // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 41–53. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53>.

5. Abdollahi, S. E. Design and Analysis of a Double-Sided Linear Induction Motor for Transportation / S. E. Abdollahi, M. Mirzayee, M. Mirsa // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. Vol. 51, Iss. 7. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2407856>.
6. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: в 2 ч. / И. П. Копылов; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2018. Ч. 1. 490 с.
7. Creppe, R. C. Influence of Design Parameters on Linear Induction Motor End Effect / R. C. Creppe, J. A. C. Ulson, J. F. Rodrigues // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2008. Vol. 23, Iss. 2. P. 358–362. <https://doi.org/10.1109/tec.2008.918594>.
8. Laporte, B. An Approach to Optimize Winding Design in Linear Induction Motors / B. Laporte, N. Takorabet, G. Vinsard // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997. Vol. 33, Iss. 2. P. 1844–1847. <https://doi.org/10.1109/20.582640>.
9. Analysis and Optimal Design of the Slit Type Low-speed Linear Induction Motors / S.-B. Yoon [et al.] // *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*. 1997. P. TB2-8.1–TB2-8.3. <https://doi.org/10.1109/iemdc.1997.604225>.
10. Pourmoosa, A. A. Design Optimization, Prototyping and Performance Evaluation of a Low-Speed Linear Induction Motor with Toroidal Winding / A. A. Pourmoosa, M. Mirsa // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015. Vol. 30, Iss. 4. P. 1546–1555. <https://doi.org/10.1109/tec.2015.2457397>.
11. Zare-Bazghaleh, A. Optimum Design of Single-Sided Linear Induction Motors for Improved Motor Performance / A. Zare-Bazghaleh, M. R. Naghashan, M. R. Meshkatoddini // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010. Vol. 46, Iss. 11. P. 3939–3947. <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2062528>.
12. Shiri, A. Design Optimization and Analysis of Single-Sided Linear Induction Motor, Considering All Phenomena / A. Shiri, A. Shoulaie // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012. Vol. 27, Iss. 2. P. 358–362. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2190416>.
13. Design of HTS Linear Induction Motor Using GA and the Finite Element Method / J. Zhao [et al.] // 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Taichung, 2010. P. 527–531. <https://doi.org/10.1109/iciea.2010.5517100>.
14. Isfahani, H. Design Optimization of a Low-Speed Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Efficiency and Power Factor / H. Isfahani, B. M. Ebrahimi, H. Lesani // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44, Iss. 2. P. 266–272. <https://doi.org/10.1109/tmag.2007.912646>.
15. Choice of a Numerical Differentiation Formula in Detailed Equivalent Circuits Models of Linear Induction Motors / V. Dmitrievskii [et al.] // 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Capri, 22–24 June 2016. Capri, 2016. P. 458–463. <https://doi.org/10.1109/speedam.2016.7525888>.
16. Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения / Ф. Н. Сарапулов [и др.] // *Электротехника*. 2018. № 4. С. 58–63.
17. Equivalent Circuits for Single-Sided Linear Induction Motors / W. Xu [et al.] // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010. Vol. 46, Iss. 6. P. 2410–2423. <https://doi.org/10.1109/tia.2010.2073434>.
18. Zare-Bazghaleh, A. Derivation of Equivalent Circuit Parameters for Single-Sided Linear Induction Motors / A. Zare-Bazghaleh, M. Naghashan, A. Khodadoost // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2015. Vol. 43, Iss. 10. P. 3637–3644. <https://doi.org/10.1109/tps.2015.2474746>.
19. An Improved Equivalent Circuit Model of a Single-Sided Linear Induction Motor / W. Xu [et al.] // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2010. Vol. 59, Iss. 5. P. 2277–2289. <https://doi.org/10.1109/tvt.2010.2043862>.
20. Amiri, E. A Novel Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motors Considering Static and Dynamic End Effects / E. Amiri, E. A. Mendrela // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50, Iss. 3. P. 120–128. <https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2285222>.
21. 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>.

22. Woronowicz, K. A Novel Linear Induction Motor Equivalent-Circuit with Optimized End Effect Model / K. Woronowicz, A. Safaei // *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2014. Vol. 37, Iss. 1. P. 34–41. <https://doi.org/10.1109/cjece.2014.2311958>.
 23. Сарапулов, Ф. Н. Развитие математических моделей тепловых процессов в линейных асинхронных двигателях / Ф. Н. Сарапулов, В. В. Гоман // *Электротехника*. 2009. № 8. С. 17–21.
 24. A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines / G. Lei [et al.] // *Energies*. 2017. Vol. 10, Iss. 12. P. 1962. <https://doi.org/10.3390/en10121962>.
 25. Аветисян, Дж. А. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ / Дж. А. Аветисян, В. С. Соколов, В. Х. Хан. М.: Энергия, 1976. 208 с.
 26. Nelder, J. A. A Simplex Method for Function Minimization / J. A. Nelder, R. Mead // *The Computer Journal*. 1965. Vol. 7, Iss. 4. P. 308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.
 27. Optimal Design of a High-Speed Single-Phase Flux Reversal Motor for Vacuum Cleaners / V. Dmitrievskii [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, Iss. 12. P. 3334. <https://doi.org/10.3390/en11123334>.
 28. Prakht, V. Optimal Design of Gearless Flux-Switching Generator with Ferrite Permanent Magnets / V. Prakht, V. Dmitrievskii, V. Kazakbaev // *Mathematics*. 2020. Vol. 8, Iss. 2. P. 206. <https://doi.org/10.3390/math8020206>.
 29. Dmitrievskii, V. Design Optimization of a Permanent-Magnet Flux-Switching Generator for Direct-Drive Wind Turbines / V. Dmitrievskii, V. Prakht, V. Kazakbaev // *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 19. P. 3636. <https://doi.org/10.3390/en12193636>.
 30. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. М.: Телеком, 2004. 383 с.
- Поступила 18.12.2020 Подписана в печать 23.02.2021 Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Veselovskii O. N., Konyaev A. Yu., Sarapulov F. N. (1991) *Linear Induction Motors*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 255 (in Russian).
2. Yamamura S. (1979) *Theory of Linear Induction Motors*. New York, Halsted Publ. 180.
3. Gieras J. F. (1994) *Linear Induction Drives*. London, Oxford Univ. Press. 320.
4. Ngo Phuong Le, Gul'kov G. I. (2017) Calculation of a Mechanical Characteristic of Electric Traction Motor of Electric Vehicle. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 41–53. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53> (in Russian).
5. Abdollahi S. E., Mirzayee M., Mirsa M. (2015) Design and Analysis of a Double-Sided Linear Induction Motor for Transportation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (7), 1–7. <https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2407856>.
6. Kopylov I. P. (2018) *Design of Electric Machines. Part 1. 4th ed., Revised and Expanded*. Moscow, Yurait Publ. 490 (in Russian).
7. Crepe R. C., Ulson J. A. C., Rodrigues J. F. (2008) Influence of Design Parameters on Linear Induction Motor End Effect. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23 (2), 358–362. <https://doi.org/10.1109/tec.2008.918594>.
8. Laporte B., Takorabet N., Vinsard G. (1997) An Approach to Optimize Winding Design in Linear Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33 (2), 1844–1847. <https://doi.org/10.1109/20.582640>.
9. Yoon S.-B., Jung I.-S., Kim K.-C., Hyun D.-S. (1997) Analysis and Optimal Design of the Slit Type Low-speed Linear Induction Motors. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, TB2-8.1–TB2-8.3. <https://doi.org/10.1109/iemdc.1997.604225>.
10. Pourmoosa A. A., Mirsa M. (2015) Design Optimization, Prototyping and Performance Evaluation of a Low-Speed Linear Induction Motor with Toroidal Winding. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30 (4), 1546–1555. <https://doi.org/10.1109/tec.2015.2457397>.
11. Zare-Bazghaleh A., Naghashan M. R., Meshkatoddini M. R. (2010) Optimum Design of Single-Sided Linear Induction Motors for Improved Motor Performance. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46 (11), 3939–3947. <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2062528>.

12. Shiri A., Shoulaie A. (2012) Design Optimization and Analysis of Singlesided Linear Induction Motor, Considering All Phenomena. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (2), 358–362. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2190416>.
13. Zhao J., Zhang W., Fang J., Yang Z., Zheng T. Q., Liu Y. (2010) Design of HTS Linear Induction Motor Using GA and the Finite Element Method. *5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Taichung, 2010. 527–531. <https://doi.org/10.1109/iciea.2010.5517100>.
14. Isfahani H., Ebrahimi B. M., Lesani H. (2008) Design Optimization of a Low-Speed Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Efficiency and Power Factor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44 (2), 266–272. <https://doi.org/10.1109/tmag.2007.912646>.
15. Dmitrievskii V., Goman V., Sarapulov F., Prakht V., Sarapulov S. (2016) Choice of a Numerical Differentiation Formula in Detailed Equivalent Circuits Models of Linear Induction Motors. *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Capri, 22–24 June 2016, 458–463. <https://doi.org/10.1109/speedam.2016.7525888>.
16. Sarapulov F. N., Frizen V. E., Shvydkiy E. L., Smol'yanov I. A. (2018) Mathematical Modeling of a Linear-Induction Motor Based on Detailed Equivalent Circuits. *Russian Electrical Engineering*, 89 (4), 270–274. <https://doi.org/10.3103/S1068371218040119>.
17. Xu W., Zhu J. G., Zhang Y., Li Z., Li Y., Wang Y. [et al.] (2010) Equivalent Circuits for Single-Sided Linear Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46 (6), 2410–2423. <https://doi.org/10.1109/tia.2010.2073434>.
18. Zare-Bazghaleh A., Naghashan M., Khodadoost A. (2015) Derivation of Equivalent Circuit Parameters for Single-Sided Linear Induction Motors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (10), 3637–3644. <https://doi.org/10.1109/tps.2015.2474746>.
19. Xu W., Zhu J. G., Zhang Y., Li Y., Wang Y., Guo Y. (2010) An Improved Equivalent Circuit Model of a Single-Sided Linear Induction Motor. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59 (5), 2277–2289. <https://doi.org/10.1109/tvt.2010.2043862>.
20. Amiri E., Mendrela E. A. (2014) A Novel Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motors Considering Static and Dynamic End Effects. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50 (3), 120–128. <https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2285222>.
21. 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).
22. Woronowicz K., Safaee A. (2014) A Novel Linear Induction Motor Equivalent-Circuit with Optimized End Effect Model. *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 37 (1), 34–41. <https://doi.org/10.1109/cjece.2014.2311958>.
23. Sarapulov F. N., Goman V. V. (2009) Development of Mathematical Models of Thermal Processes in Linear Asynchronous Motors. *Russian Electrical Engineering*, 80 (8), 431–435. <https://doi.org/10.3103/S1068371209080045>.
24. Lei G., Zhu J., Guo Y., Liu C., Ma B. (2017) A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines. *Energies*, 10 (12), 1962. <https://doi.org/10.3390/en10121962>.
25. Avetisyan D. A., Sokolov V. S., Khan V. Kh. (1976) *Computer-Aided Optimal Design of Electrical Machines*. Moscow, Energiya Publ. 208 (in Russian).
26. Nelder J. A., Mead R. (1965) A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7 (4), 308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.
27. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., Sarapulov S. (2018) Optimal Design of a High-Speed Single-Phase Flux Reversal Motor for Vacuum Cleaners. *Energies*, 11 (12), 3334. <https://doi.org/10.3390/en11123334>.
28. Prakht V., Dmitrievskii V., Kazakbaev V. (2020) Optimal Design of Gearless Flux-Switching Generator with Ferrite Permanent Magnets. *Mathematics*, 8 (2), 206. <https://doi.org/10.3390/math8020206>.
29. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V. (2019) Design Optimization of a Permanent-Magnet Flux-Switching Generator for Direct-Drive Wind Turbines. *Energies*, 12 (19), 3636. <https://doi.org/10.3390/en12193636>.
30. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. (2004) *Neural Networks, Genetic Algorithm and Fuzzy Systems*. Moscow, Telecom Publ. 383 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-517-524>

UDC 621.039

Study of Parametric Interactions in the Nuclear Reactor Control with Feedback

V. V. Opiatiuk¹, I. L. Kozlov¹, V. I. Skalozubov¹, I. A. Ostapenko²

¹Odessa National Technical University (Odessa, Ukraine),

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
(Kyiv, Ukraine)

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

Abstract. This article considers the principal theoretical possibility of regulating a nuclear power reactor under changing operating modes conditions when external periodic disturbances take place in conditions of changing the operating mode. By the external periodic perturbation a downward change in the conditions of the heat sink was meant. The magnitude of the changes was preliminarily calculated in such a way that the operating conditions of the power plant did not exceed the boundaries of the safe operation zone of the reactor. In the case of approaching the operation parameters to the critical ones, the heat sink was increased until the working conditions returned to their previous state. In this work the amplitude frequency response of a non-linearly enhanced system in the nuclear power plant operating conditions when non-linearly reacting to external periodic influences has been studied. The external cyclic disturbances effect produced on the reactor that initially existed under stationary operating conditions has been considered. The research was carried out by numerical simulation of the competition between processes occurring in a nuclear power plant and determined by the system’s reaction time and relaxation time while responding to periodic external influences. Calculations of the relaxation time dependence on the fixed frequency-revealing external influence’s temperature are presented. Also, the relaxation time dependence on the frequency of external influence at a fixed temperature for systems with various relaxation periods was calculated. It is determined that when the dependence between system temperature and the external influence time is calculated, there exists a wide range of possible frequency control. To evaluate the behavior of a nuclear power reactor under conditions of operating modes changes, a fundamental physical mathematical model of the reactor’s state under external harmonic influence is presented. It is based on the nonlinear Riccati equation. The external harmonic effect was simulated by changing the heat supply and heat removal conditions near the critical point.

Keywords: amplitude frequency response, cyclic disturbances, harmonic effects, reaction time, relaxation time, polycyclic regulation, aperiodic instability

For citation: Opiatiuk V. V., Kozlov I. L., Skalozubov V. I., Ostapenko I. A. (2021) Study of Parametric Interactions in the Nuclear Reactor Control with Feedback. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 517–524. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-517-524>

Адрес для переписки

Опятюк Владислав Владимирович
Одесский национальный политехнический университет
просп. Шевченко, 1,
65044, г. Одесса, Украина
Тел.: +380 66 772-26-59
vladopat@ukr.net

Address for correspondence

Opiatiuk Vladyslav V.
Odessa National Technical University
1, Shevchenko Ave.,
65044, Odessa, Ukraine
Tel.: +380 66 772-26-59
vladopat@ukr.net

Исследование параметрических взаимодействий при регулировании ядерного реактора с обратной связью

В. В. Опятюк¹⁾, И. Л. Козлов¹⁾, В. И. Скалозубов¹⁾, И. А. Остапенко²⁾

¹⁾Одесский национальный политехнический университет (Одесса, Украина),

²⁾Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Киев, Украина)

Реферат. Рассмотрена принципиальная теоретическая возможность регулирования ядерного энергетического реактора, находящегося под воздействием внешних периодических возмущений, в условиях изменения режимов работы. Под внешним периодическим возмущением подразумевалось изменение условий теплоотвода в сторону уменьшения. Величина изменений предварительно рассчитывалась таким образом, чтобы условия работы энергетической установки не выходили за границы зоны безопасной работы реактора. В случае приближения параметров работы к критическим теплоотвод увеличивался до момента возвращения условий работы в прежнее состояние. Изучен амплитудный частотный отклик нелинейно обостренной системы в условиях работы ядерной энергетической установки, нелинейно реагирующей на внешние периодические воздействия. Рассмотрено воздействие внешних циклических возмущений на реактор, исходно находящийся в стационарном рабочем состоянии. Проведены исследования путем численного моделирования конкуренции процессов, протекающих в ядерной энергетической установке, которые определяются временем реакции и временем релаксации системы на периодическое внешнее воздействие. Представлены расчеты зависимости времени релаксации от температуры внешнего воздействия при фиксированной частоте, времени релаксации от частоты внешнего воздействия при фиксированной температуре для систем с разным временем релаксации. Определено, что при расчете зависимости температуры системы от времени внешнего воздействия существует широкая зона возможного частотного регулирования. Для оценки поведения ядерного энергетического реактора в условиях изменения режимов работы создана принципиальная физико-математическая модель состояния реактора, находящегося под внешним гармоническим воздействием, на основе нелинейного уравнения Риккати. Внешнее гармоническое воздействие моделировалось путем изменения условий теплоотвода и теплоотвода вблизи критической точки.

Ключевые слова: амплитудный частотный отклик, циклические возмущения, гармонические воздействия, время реакции, время релаксации, полициклическое регулирование, апериодическая неустойчивость

Для цитирования: Исследование параметрических взаимодействий при регулировании ядерного реактора с обратной связью / В. В. Опятюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 6. С. 517–524. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-517-524>

Introduction

At present, the nuclear power plant' nuclear reactors mainly operate in a stationary operational (basic) mode, when the reactor' specified power level remains constant for a long time.

Dynamic modes with changes in the reactor power level are associated with transient processes during unit starts and stops, or in cases of emergencies of various types' [1–4].

Recently, the public and experts in the field of nuclear energy use have been actively discussing the issue of NPP' nuclear power plants units engagement into daily power control. The ability of nuclear power plants to participate in total energy supply and consumption system load control is a crucial factor in further development of nuclear energy domain [5, 6]. As an example of such general power system load regulation, we can mention France, where more than 75 %

of electricity is produced at nuclear power plants (PWR – type reactors are analogs of WWER ones), and maneuvering modes have been introduced since the mid-70s of the last century. Parameters of maneuvering mode at some French nuclear reactors are shown in Fig. 1 [7].

However, when the reactor operates in transient modes, a complex interweaving of heterogeneous physical processes occurs, which processes form internal feedbacks that cause a destabilizing effect [8].

When these feedbacks are strong enough and changes in the reactor operating parameters reveal proper phase shifts, the reactor's stationary operation mode turns out to be unstable [9–11] and can go to the upper critical state (UCS) zone, which is unacceptable from the point of view of the thermal explosion theory.

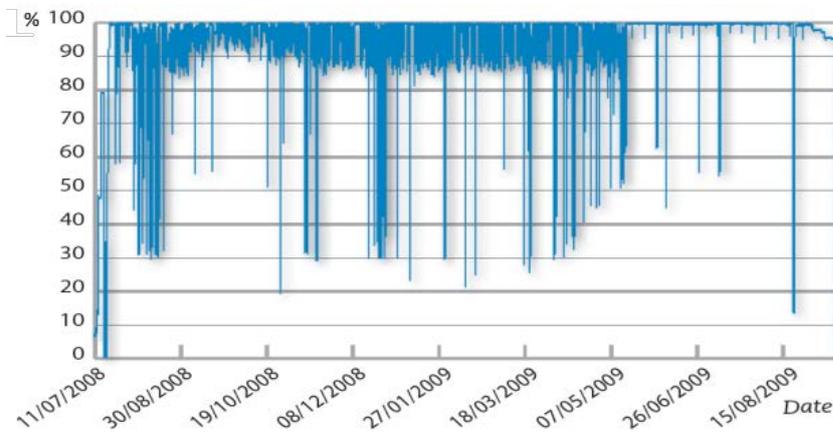


Fig. 1. Power history for a one year from a French PWR (units of 900 MW) in percent of rated power [12] from July, 2008 – August, 2009

The study of transient processes and stability of oscillations in a nonlinear system under parametric excitation allows evaluating its power, amplitude, and frequency characteristics. The analysis of transient processes and stability of oscillations clearly shows the relationship between the initial conditions of impact and the system response in the form of periodic repeated oscillations (polycyclic) [13, 14]. Consideration of transient processes and issues of oscillation stability in nonlinear parametric systems is of considerable scientific and practical interest for creating new methods applied in designing controlled influence modes. This article purpose is to show the principal theoretical possibility of the nuclear reactor polycyclic regulation under changing operating modes conditions through studying the parametric interactions of the system under external harmonic influences.

It is shown in [15–18] that chaotic fluctuations in the neutron density can occur in specific type's nuclear reactors due to the action of internal reactivity feedbacks. In boiling reactors, dynamic chaos can be excited due to feedback on the vapor content in the core [19–21], at reactors with gaseous nuclear fuel due to density feedback [22, 23], and in pulsed batch reactors they are due to the

combined action of feedback on the fuel temperature and external periodic changes in reactivity [24].

Theoretical and experimental studies of the nuclear reactors stability show that additional feedbacks due to the presence of regulation and control bodies can also cause unstable operation of the reactor. Steady-state instability can take a variety of forms, the most common of which are aperiodic and oscillatory [25] ones.

Aperiodic instability is characterized by the fact that after small perturbations of the stationary regime, the neutron density and other values characterizing the reactor are monotonically, aperiodically shifting from their stationary values over time.

Oscillatory instability is characterized by self-excitation of increasing fluctuations of the values describing the reactor operation near their stationary values. Due to the nonlinear relationships between these values, oscillations with finite amplitude determined by the reactor parameters (self-oscillations) are established in the reactor.

Main part

To solve the problem of polycyclic regulation for a nuclear reactor under conditions of changing its operating modes, the amplitude frequency response in nonlinear – enhanced systems was studied.

The effect of external periodic disturbances on a reactor initially in a stationary state has been considered. The supposed process is shown in Fig. 2.

In order to adjust the power characteristics, it is assumed to shift the reactor's operating point, for example, to the level of 70 % of the design capacity and periodically produce effects to the reactor by changing the heat exchange conditions. Reducing the frequency of exposure will lead to a decrease in the released power of the operating reactor.

Higher frequency exposure will lead to increased power during reactor operation [26]. In this case, the main condition shall be to prevent the reactor from operating at mode close to the UCS.

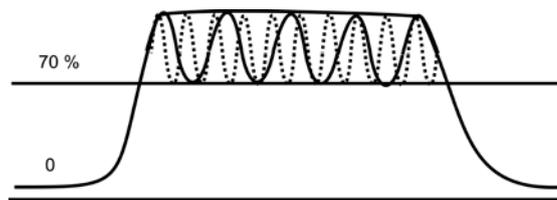


Fig. 2. Supposed process of the nuclear reactor operation under polycyclic control

This process is described by the following Riccati equation [27, 28]:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \kappa e^{\theta} - \theta + \theta_A \cos \omega' \tau, \quad (1)$$

where θ – dimensionless temperature parameter; $\tau = t/\tau_\gamma$ – dimensionless exposure time; $\kappa = \tau_r/\tau_x$ – Semyonov parameter; ω' – dimensionless frequency; θ_A – amplitude of external harmonic influence in dimensionless form

$$\theta_A = T_A E / RT_\infty^2, \quad (2)$$

where T_A – temperature in the reactor, K; T_∞ – temperature of the cooling medium, K; E – activation energy (5.75 MeV); R – universal gas constant [29].

The dimensionless frequency in its physical sense is the ratio of two characteristic times of the process: the relaxation time and the period of disturbance action.

There is no analytical solution to equation (1), since the right-hand side contains a source written in harmonic form. Therefore, the numerical parametric calculation of this equation solution that includes the temperature parameter variation with the amplitude of the external harmonic action θ_A and the perturbation frequency ω' is carried out.

Also, the research was carried out by computer calculations of the competition between processes that are determined by the system's reaction time and relaxation time against the periodic external influence.

The calculation of the system temperature amplitude parameter dependence on the external influence time [30] is shown in Fig. 3, where it can be seen that there exists a wide range of possible frequency control.

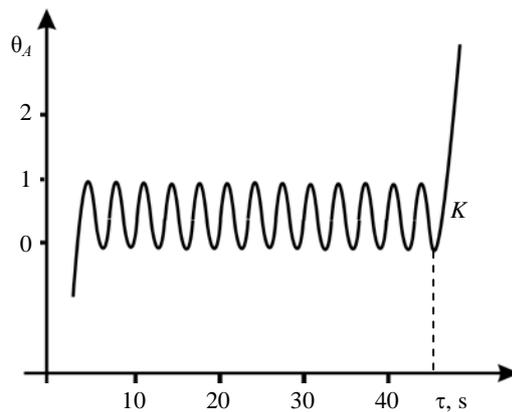


Fig. 3. Graph of the dependence between the θ_A amplitude temperature parameter and the time τ of enhanced system under the influence of external factors

The K zone shown in the right part of the graph represents an intolerable mode of reactor operation. In the future, for each set of parameters, the induction time τ_i was found, which means the duration of nonlinear critically enhanced system transition from a stable initial state to an unstable explosive one.

Interpretation of the results and their approbation

Fig. 4, 5 show the results of the induction time τ_i dependence on the temperature parameter of amplitude θ_A and the external influence frequency ω , respectively. The Fig. 4 shows the descending dependence of the induction time on the temperature perturbation amplitude at various fixed frequencies. This result

is obvious, since for a nonlinear system of an exothermically reacting medium, its response to the heating phase is stronger than the response of the system cooling phase. The Fig. 5 shows an increase in the induction time with increasing frequency when the external perturbation amplitude temperature parameter is fixed. This is due to the fact that, with increasing frequency, the response of a nonlinear system to external influences decreases due to its thermal inertia.

Thus, the induction time is a function of the amplitude temperature parameter and exposure frequency $\tau_i = f(\theta_A, \omega')$. When this transition time is fixed, the amplitude temperature parameter depends on the frequency. This relationship is shown in Fig. 6 for different transition times. It can be seen with high accuracy ($\sim 1\%$) that curves 1–3 are approximated by a linear function.

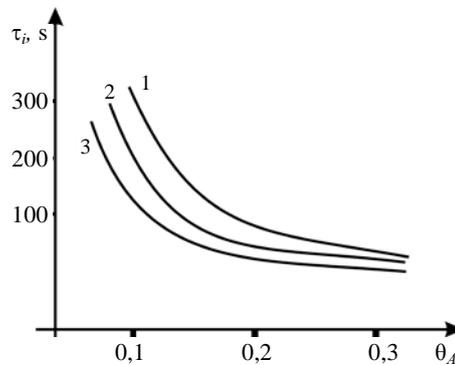


Fig. 4. Graph of the τ_i induction time dependence on the external influence amplitude θ_A at a fixed frequency:
1 – pulsation period of 1000 s;
2 – 2000 s; 3 – 3000 s

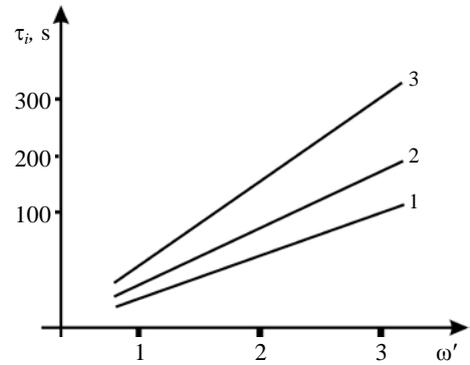


Fig. 5. Graph of the τ_i induction time dependence on the external influence frequency $\omega' = \omega\tau_\gamma$ at a fixed temperature:
1 – 500 K; 2 – 700 K; 3 – 900 K

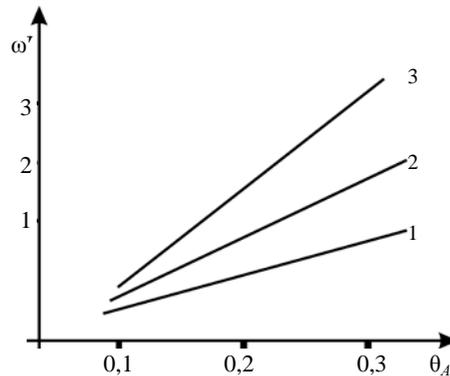


Fig. 6. Graph of the $\omega' = \omega\tau_\gamma$ external influence frequency dependence on the θ_A external influence amplitude for an enhanced system, in which the transition from a low-temperature to a high-temperature state was observed for a fixed time:
1 – 3000 s; 2 – 2000 s; 3 – 1000 s

So, in order for the transition of an enhanced system from one state to another, a higher frequency requires more energy, since the temperature is proportional to the thermal energy. That is, the external influence energy, which is sufficient to transfer the system from one stable state to another, is proportional to the impact frequency. This result echoes the well-known quantum-mechanical relation [31, 32], where, just as in our case, the energy is proportional to the frequency in the first power.

The considered solution to the polycyclic reactor power control

problem is possible only after the development of new general recommendations for the technological regulations and technical conditions of reactor operation, operation of control and measuring equipment and safety systems for such a nuclear reactor control conditions.

CONCLUSIONS

1. The principal possibility of polycyclic control for a nuclear reactor under conditions of operating modes changing through investigation into the system parametric interactions under external harmonic influences has been considered.

2. The relations for studying the stability of a nonlinear system oscillations in parametric excitation zones have been described.

3. It is determined that the response of a non-linearly reacting system is directly proportional to the frequency and amplitude of the harmonic effect.

4. The results of study on the assessing the induction time dependence from amplitude temperature parameter and frequency of external impact, respectively, have been presented.

5. The necessity of new recommendations development and elaboration of algorithms for the technological regulations and technical conditions of a nuclear reactor operation in conditions of polycyclic control has been outlined.

REFERENCES

1. Proskuryakov K. N. (2015) *Nuclear Power Plants*. Moscow, MPEI Publishing House. 446 (in Russian).
2. Kazanskii Yu. A., Slemenichs Ya. V. (2018) Power Coefficient of Reactivity Used for Assessing the Results of Transients in Power Reactors. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*, (1), 63–74. <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.07> (in Russian).
3. Kliuchnykov A. A., Sharaevskii I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevskaya E. I. (2012) *Thermophysics of Nuclear Reactors Breakdowns*. Chernobyl, In-t Problem Bezopasnosti AES NAN Ukrainy. 528 (in Russian).
4. Elmer E. Lewis (2008) *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*. Elsevier. 280. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370631-7.X0001-0>.
5. Mikhalevich A. A., Rak U. A. (2021) Belarus Power Engineering System Modeling Taking into Account the Nuclear Power Plant Commissioning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14> (in Russian).
6. Khrustalev V. A., Gariievskii M. V. (2021) Efficiency of Using the Auxiliary Boiler for Peak Power Generation by a Steam Turbine of NPP. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 78–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-78-90> (in Russian).
7. Lokhov A. (2011) Load-Following with Nuclear Power Plants. *NEA News*, 29 (2), 18–20.
8. *Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants* (2011) OECD-NEA, France, June 2011. 53. <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011>.
9. Kazanskii Yu. A., Slemenichs Ya. V. (2012) *Kinetics of Nuclear Reactors. Coefficients of Reactivity. Introduction to Dynamics*. Moscow, NIYaU MIFI Publ. 300 (in Russian).
10. Cherkesova L. V., Cherednikov P. I. (2003) Study of Stability and Transient Processes in Non-linear Systems of Various Nature. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, (3), 50–63 (in Russian).
11. Cherednikov P. I., Podgayko O. I. (2001) Investigation of the Non-Linear System Oscillations Stability in Upper Zones of Parametric Excitation. *Radioelektronika i Informatika = Radioelectronics & Informatics*, 1 (14), 12–15 (in Russian).

12. Kozlov V. N., Trosko I. U. (2012) A Stable Modes of Power Systems Based on Chaos Control. *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politehnicheskogo Universiteta. Nauka i Obrazovanie* [Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Science and Education], (3–1), 111–117 (in Russian).
13. Cherkesova L. V. (2003) Nonlinear-Parametric Interactions in Resonant Systems of Different Physical Nature under Polyharmonic External Influence. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Tekhnicheskie Nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, (4), 31–37 (in Russian).
14. Cherkesova L. V., Podgayko O. I. (2005) Investigation of Parametric Interactions in a Resonant System under Polyharmonic External Influence. *Kontrol'no-Izmeritel'nyye Pribory i Avtomatika* [Control, Measuring Devices and Automation], (5–6), 52–56 (in Russian).
15. Postnikov N. S. (2000) Conditions for the Existence of Chaotic Oscillations in Nuclear Reactors. *Atomic Energy*, 88 (6), 449–455. <https://doi.org/10.1007/BF02673467>.
16. Postnikov N. S. (2003) Chaotic Dynamics of Nuclear Reactors. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya: Fizika Yadernykh Reaktorov = Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*, (3), 13–22 (in Russian).
17. Postnikov N. S. (2011) Chaotic Oscillations in a Regulated Zero-Power Nuclear Reactor. *Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod*, 2 (1), 164–169 (in Russian).
18. Postnikov N. S. (2003) Dynamical Chaos in Nuclear Reactors. *Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Seriya: Matematicheskoe Modelirovanie i Optimal'noe Upravlenie = Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. Series: Mathematical Modeling and Optimal Control*, (1), 92–107 (in Russian).
19. Lee J. D., Pan C. (2005) Nonlinear Analysis for a Nuclearcoupled Two-Phase Natural Circulation Loop. *Nuclear Engineering and Design*, 235 (5), 613–626. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.09.008>.
20. Postnikov N. S. (2004) Possibility, Admissibility and Desirability of Implementing Pulsed Stochastic Regimes in Boiling-Water Reactors with Natural Coolant Circulation. *Atomic Energy*, 97 (6), 820–828. <https://doi.org/10.1007/s10512-005-0068-y>.
21. Postnikov N. S. (2009) Investigation of Chaotic Oscillations in Boiling-Water Reactors. *Atomic Energy*, 107 (5), 291–301. <https://dlib.eastview.com/browse/doc/21106082> (in Russian).
22. Postnikov N. S. (2003) Possibility, Admissibility and Desirability of Implementing Pulsed Stochastic Regimes in Reactors with Gaseous Nuclear Fuel. *Atomic Energy*, 95 (5), 741–748. <https://doi.org/10.1023/b:aten.0000016758.53656.51>.
23. Postnikov N. S. (2012) Pulsed Chaos in Gaseous-Fuel Nuclear Reactors. *Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*, 1 (1), 160–166 (in Russian).
24. Shabalin E. P. (1991) Stochastic Dynamics of Periodic Actuation Pulsed Reactor. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya: Fizika Yadernykh Reaktorov = Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*, (4), 3–9 (in Russian).
25. Postnikov N. S. (2006) Methods for Controlling Pulsed Stochastic Operating Regimes of Nuclear Reactors. *Atomic Energy*, 101 (2), 555–563. <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0130-4>.
26. Frank-Kamenetskii D. A. (1987) *Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics*. Moscow, Nauka Publ. 502 (in Russian).
27. Polyanin A. D., Zaitsev V. F. (2003) *Handbook of Exact Solutions for Ordinary Differential Equations*. Chapman and Hall/CRC. 2nd ed. 816. <https://doi.org/10.1201/9781420035339>.
28. Kondratyev E., Gerasymenko A., Merkotan K., Rusov V. (2011) Behavior of Nonlinear Reactive System under External Harmonic Perturbation Nearby a Critical State. *Visnyk of the Lviv University. Series Physics*, (46), 63–70.
29. Shirokov S. V. (2011) *Nuclear Reactor Physics*. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 349 (in Russian).
30. Opyatyuk V. V. (2016) The Behavior of a Flow Reactor of Ideal Mixing Near Singular Points and its Effectiveness. *Goreniye i Plazmokhimiya*, 14 (3), 182–188 (in Russian).
31. Martinson L. K., Smirnov E. V. (2012) *Quantum Physics*. Moscow, Publishing House of MSTU im. N. E. Bauman. 526. (in Russian).
32. Yavorskiy B. M., Detlaf A. A., Lebedev A. K. (2006) *Physics Handbook for Engineers and Higher Education Students*. Moscow. 1056 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>

UDC 628.38

Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water

A. N. Pekhota¹, B. M. Khroustalev², Vu Minh Phap³, V. N. Romaniuk²,
E. A. Pekhota¹, R. N. Vostrova¹, Nguyen Thuy Nga³

¹Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus),

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

³Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology
(Hanoi, Socialist Republic of Vietnam)

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

Abstract. An assessment is given to the problems of urban wastewater sludge utilization in our country and abroad, with determination of formation and usage level. Global trends in the reduction of carbon dioxide emissions exacerbate the urgency of solving the designated tasks. At the same time, recently, in connection with the EU's plans to introduce a cross-border carbon levy, it has become necessary to reduce the carbon footprint from burning traditional fuels, which is an urgent problem of modern society. One of the directions that provide a solution to this problem is the replacement of part of the hydrocarbon fuel by the consumption of multicomponent solid fuel based on the use of combustible waste that is part of the multicomponent fuel. This solid fuel can be used to meet the needs of small consumers, for example, in the autumn-summer period to generate a drying agent for the preparation of grain on the threshing-floor, in small boiler houses, in sand drying plants of locomotive depots, heat installations of hangars and workshops, as well as in other heat-generating installations operating on solid fuels. At the same time, solving the problem of reducing the carbon footprint for Belarus is closely related to another urgent task – reducing the energy component of industrial products and the environmental consequences of storing accumulated and generated waste. The paper presents the results of joint scientific research in the field of application of modern technologies and equipment using electrohydraulic treatment to reduce and minimize the level of anthropogenic and polluting substances in wastewater sludge. The described technological equipment, technology and post-treatment modes reduce the content of harmful substances in the wastewater sludge composition even with short-term treatment. An assessment of the effectiveness of the developed technology for the use of sewage sludge is given, using the method of wet multicomponent briquetting to obtain a multicomponent fuel. The presented process flow diagram of multicomponent briquetting using sewage sludge and plant-wood waste directly shows the undeniable advantages of using watered wastewater sludge as a raw material for the production of solid fuel. At the same time, the optimally selected ratio of components and moisture content of the briquetted composition solves a number of technologically difficult problems that cannot be realized using traditional briquetting technologies.

Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Khroustalev Boris M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

The presented data of the conducted research and the developed technology make it possible to expand the area of using wastewater sludge as a secondary renewable material resource.

Keywords: waste, combustible secondary energy resources, wastewater sludge, municipal waste of the city, industrial waste, ecology, fuel, briquette, multicomponent solid fuel, carbon tax, volume of waste generation, electrohydraulic treatment

For citation: Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu Minh Phap, Romaniuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen Thuy Nga (2021) Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>

Технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием отходов сточных вод

А. Н. Пехота¹⁾, Б. Н. Хрусталеv²⁾, Ву Минь Фап³⁾, В. Н. Романюк²⁾,
Е. А. Пехота¹⁾, Р. Н. Вострова²⁾, Нгуен Тху Нга³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь),

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

³⁾Научный институт энергетики Вьетнамской академии наук и технологий
(Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам)

Реферат. Дана оценка проблемам утилизации осадков городских сточных вод в Беларуси и за рубежом с определением уровня их образования и использования. Мировые тенденции сокращения выбросов диоксида углерода обостряют актуальность решения указанных задач. В связи с планами Европейского союза по введению трансграничного углеродного сбора возникла необходимость снижения углеродного следа от сжигания традиционных видов топлива, что является актуальной проблемой для современного общества. Одно из направлений ее решения – замещение части углеводородного топлива многокомпонентным твердым на основе горючих отходов. Твердое топливо можно использовать для обеспечения нужд мелких потребителей, например в осенне-летний период для генерации сушильного агента при подготовке зерна на токах, на мелких котельных, в сушильных установках песка локомотивных депо, теплоустановках ангаров и мастерских, а также в иных теплогенерирующих установках. При этом для Беларуси снижение углеродного следа тесно связано с другой актуальной задачей – уменьшением энергетической составляющей промышленной продукции и экологических последствий хранения накопленных и образующихся отходов. В статье представлены результаты совместных научных исследований в области применения современных технологий и оборудования, использующих электрогидравлическую обработку для снижения и минимизации уровня содержания антропогенных и загрязняющих веществ в осадке сточных вод. Описанное технологическое оборудование, технология и режимы доочистки позволяют снизить содержание вредных веществ в осадке сточных вод даже при кратковременной обработке. Дана оценка эффективности разработанной технологии использования осадка сточных вод с применением метода влажного многокомпонентного брикетирования для получения многокомпонентного топлива. Представленная принципиальная технологическая схема многокомпонентного брикетирования с использованием осадка сточных вод и растительно-древесных отходов показывает неоспоримые преимущества применения обводненного осадка сточных вод в качестве сырья для производства твердого топлива. При этом оптимально подобранное соотношение компонентов и влажности брикетируемого состава решает ряд технологически трудных задач, не реализуемых с помощью традиционных технологий брикетирования. Проведенные исследования и раз-

рабочая технология позволяют расширить область использования осадков сточных вод в качестве вторичного возобновляемого материального ресурса.

Ключевые слова: отходы, горючие вторичные энергетические ресурсы, осадок сточных вод, коммунальные отходы города, промышленные отходы, экология, топливо, брикет, многокомпонентное твердое топливо, углеродный сбор, объем образования отходов, электрогидравлическая обработка

Для цитирования: Технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием отходов сточных вод / А. Н. Пехота [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 6. С. 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>

In the complex of problems pertaining to housing and communal services of the Republic of Belarus, one of the most important problems continues to be – the choice of directions for the disposal of sewage sludge. The problem of utilization of urban wastewater sludge is an important environmental challenge for the cities of our country, as well as the cities of our border neighbors and the CIS countries. The amount of precipitation released during wastewater treatment at modern wastewater treatment plants ranges from 2 to 10 % of the flow rate of incoming water. At the same time, 4–5 % of the total volume of them is used in the national economy, as a rule, in the field of soil-improving compositions, in connection with which, in significant volumes, sediments are stored on the territory of treatment facilities, that creates an unfavorable environmental situation near the city limits. The main reason for this situation is the fact that the problem under consideration has not been formulated initially in all aspects, the question was not considered in such a way that the accumulation of waste in a limited area in the future would lead to the need to solve the problem at significantly higher costs. It should be borne in mind that a wastewater treatment technology can be considered as a waste-free one only when it, at the end of the process, has effective and environmentally friendly ways for using or disposing of sludge.

All of the above is of particular importance because over the past decades, many countries, as part of the development of the concept of national sustainable development strategies, have been making a rapid transition to the efficient use of industrial, municipal waste and biomass using combustion and fuel production technologies. For example, the countries of the European Union declare, by 2030, the replacement of a quarter of the fuel consumed for transport by liquid types of biofuels, the production of which will be carried out using technologies for processing various waste and biomass.

Reducing the carbon footprint, in line with the global trend to reduce carbon dioxide emissions, exacerbates the urgency of solving the designated tasks. Naturally, the carbon footprint of waste disposal remains, but there is a reduction in CO₂ emissions associated with the replacement of a part of natural gas by the consumption of anthropogenic waste included in the multicomponent fuel. The latter can be used to meet the needs of small consumers, for example, in the autumn-summer period to generate a drying agent for the preparation of grain on the threshing-floor, in small boiler houses, in sand drying plants of locomotive

depots, heat installations of hangars and workshops, as well as in other heat-generating installations operating on solid fuels.

The topic of carbon regulation has become aggravated in connection with the EU plans to introduce a cross-border carbon levy which directly affects the tax on the export of chemical and paper products, nitrogen and potash fertilizers, the oil and gas industry and metallurgy are directly subject to the tax. The prospect of transboundary carbon charges and trade in carbon dioxide emissions provided for by the Paris Agreements, taking into account the current geopolitical situation which affects the interests of not only the Republic of Belarus, but also other European countries. Finally, solving the problem of reducing the carbon footprint for Belarus is closely related to another urgent task of dramatically reducing the energy component of industrial products.

The required achievements in the use of non-conventional and renewable energy sources in the energy sector, which meet the challenges of the current moment, are possible only through the use of all the accumulated research, technological and practical experience in the involvement of combustible industrial and household waste, as well as biomass as a source of chemical energy. The development of this direction of using combustible waste as non-conventional and renewable energy sources in the energy sector is primarily associated with the increasing world consumption, provided by the growth of both national and world Gross Domestic Product in recent decades. So, according to the Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk) [1], presented in Tab. 1, the population on our planet has been increasing by 1 billion people over the past 60 years, with dynamics every 13 years. In the short term, this period will decrease to 8–11 years, which is inextricably linked with the growing need to use waste from human life and production.

Table 1

Dynamics of population growth on planet Earth

Years in which it is possible to perform calculation of population	Population of planet Earth, people	Period between years, in years
1805	1 000 000 000	555 (from 1250)
1927	2 000 000 000	122
1959	3 000 000 000	32
1974	4 000 000 000	15
1987, July 11	5000 000 000	13
1999, December 31	6 026 548 295*	12
2011, December 31	7 001 071 861*	12
2020, December 31	7 851 163 856*	9
*Revised data – according to UN fund estimates number of population for 31.12.2020 (https://countrysmeters.info/ru/World).		

Comprehensive analysis of the data shows that the world's population has increased by about 110 % per year over the past three years, with an average annual population growth of 81 million.

All this suggests that the development and implementation of technologies for the use of various wastes of human life is the most important strategic task for the entire civilized world community, to which we also count ourselves.

At the same time, at the present stage, based on the numerous results of scientific research and developed available and effective technologies, they prove that sewage sludge is a demanded secondary resource that can and should be used in various areas of the national economy.

The relevance of using briquetted fuel from wastewater sludge (WWS) is based on the fact that the main component is renewable, and its volume increases annually in proportion to the growth of population and production [2]. The use of secondary energy resources is acquiring additional relevance, also in connection with a decrease in reserves of fossil fuels, the need to strengthen energy security, as well as the economic and environmental need to increase the level of waste use. At the same time, for example, the use of wood waste in conjunction with other renewable fuels can reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere [3]. This does not completely solve the problem of climate change – but in combination with other actions can mitigate its catastrophic changes.

At this stage, one of the limiting factors for the widespread use of WWS in various developed technologies are high humidity, the presence of mineral (mechanical) impurities and an increased content of heavy metals in the fuel.

One of the solutions to these constraining factors is the use of electrohydraulic treatment of this type of waste, as a result of which, according to the conducted studies, a decrease in the quantitative content of sulfur, zinc, nickel, chromium, copper, manganese and lead has been noted. On the whole, this makes it possible to regulate and ensure the permissible content of these elements in the physicochemical composition of the used WWS at an environmentally safe or normatively required level. The external view of the installation assembled using the device “ZEVS Profi” of the “UChT-220P” type, which converts energy into current pulses of microsecond duration for electrohydraulic treatment of wastewater sludge of urban facilities, is shown in Fig. 1.

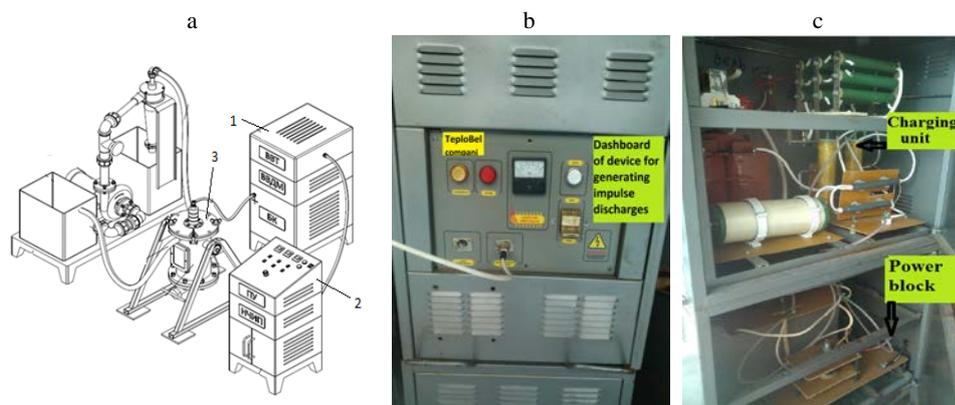


Fig. 1. Scheme and device of electrohydraulic plant for treatment of wastewater sludge of urban facilities: a – general view of the plant; b – dashboard for electrohydraulic impulses control; c – type of charging and power units generating electrohydraulic impulses

A schematic view of the equipment included in this device, which provides preparation and disposal of waste, is shown in Fig. 1a. The effect is achieved due to the fact that electric discharges occur in a humid environment of sewage sludge, creating an ultra-high pulsed hydraulic pressure, while hydrodynamic effects lead to the appearance of shock waves with sonic and supersonic speeds, which form a block of high voltage transformer 1, having a high-voltage diode bridge and a battery of storage capacitors, controlled by a control panel unit 2, equipped with a low-voltage part of the power supply, the appearance of which is shown in Fig. 1b, c. In reactor 3, as a result of a specially formed pulsed (spark, brush) high voltage electric discharge between the electrodes, powerful pulsed cavitation processes are created, which, depending on the duration, frequency, power and duration of the electric pulse of the discharge current, trigger mechanical resonance phenomena allowing material processing.

All of these factors have a variety of physical and chemical effects on the liquid and objects placed in it. Shock displacements of the liquid near the discharge zone, arising from the development and collapse of cavitation cavities, can destroy non-metallic materials and cause plastic deformation of metallic objects. At the same time, electrohydraulic waste treatment, performed without intermediate mechanical links, is accompanied by a wide range of physical and chemical phenomena such as: infra- and ultrasonic radiation, intense pulsed light, thermal, ultraviolet radiation, multiple ionization of compounds and elements contained in the processed waste [4].

All these phenomena, in combination, acting on the processed waste composition, make it possible to reduce the content of such chemical elements as Zn, Ni, Cr, Cu, Mn, Pb, S affecting the formation, for example, of emissions of harmful substances during the combustion of multicomponent fuel with using WWS, as well as with direct combustion of sewage sludge as a single-component fuel composition [5].

Tab. 2 presents the data obtained in the study of WWS of urban wastewater treatment plants in the city of Gomel for the content of various metals in liquid samples. Laboratory studies have been executed on an atomic absorption spectrometer "МГА-915М" (MGA-915M). The studies have been carried out in accordance with the methodology developed by Republican Unitary Enterprise "Central Research Institute for Complex Use of Water Resources" (Minsk, Republic of Belarus) and approved in accordance with the established procedure by "Methodology for measuring the content of metals in liquid and solid matrices by method of atomic absorption spectrometry. MVI. MN 33-69-2010".

Thus, the use of electrohydraulic treatment of sewage sludge with a high-voltage short-pulse (at the level of 10–20 μ s) electrohydraulic discharge for 3 min allows to reduce the concentration of some chemical elements in the working composition of the WWS. There is a change in the concentration of such elements as Zn, Cu, Ni (Fig. 2a, d, e) within 2.277–2.474 times, respectively, and the concentration of Mn, Cr, Pb (Fig. 2b, c, f) decreases within 1.412–1.567 times, respectively.

Table 2

Comparisons in degree of concentration change after electrohydraulic treatment
 of wastewater sludge

Serial number	Metal type	Volume, cm ³	Degree of concentration change
1	Zn	50.0	2.277
2	Ni	50.0	2.474
3	Cr	50.0	1.497
4	Cu	50.0	2.467
5	Mn	50.0	1.567
6	Pb	50.0	1.412

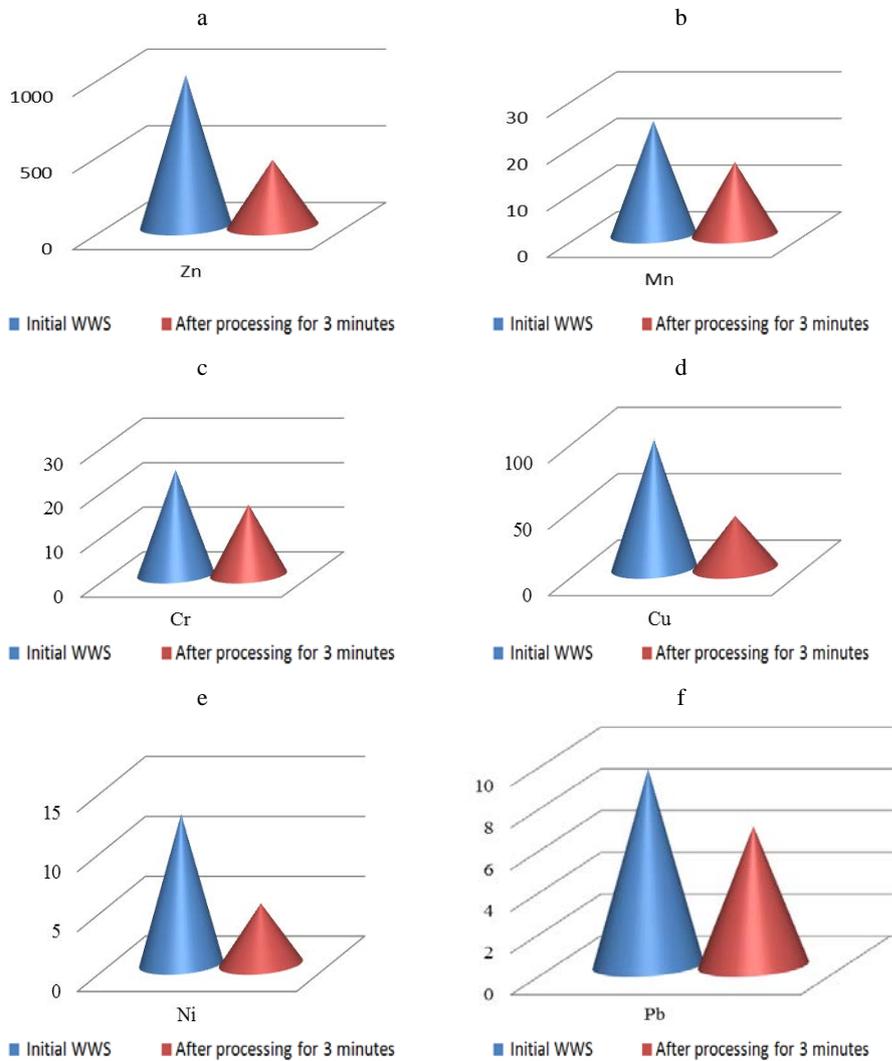


Fig. 2. Diagram of changes in the content of heavy metals in wastewater sludge:
 a – zinc; b – manganese; c – chrome; d – copper; e – nickel; f – lead

The analysis of the results obtained shows that the use of an industrial installation, which provides, in certain operating modes, the conversion of electrical energy into mechanical energy, obtaining a highly effective effect on the processed material in the form of electrohydraulic treatment of the sludge, which subsequently can find a wider technological application.

One of the directions of the integrated WWS management scheme is the energy-saving technology of sludge briquetting to obtain fuel briquettes, while WWS can be considered as a secondary energy resource that can be further burned in boiler houses.

The problems of its use to obtain solid fuel, using typical widespread technologies (RUF, C. F. Nielsen, Pini Kei, etc.) are high humidity and impurity content. However, when using the developed technology for briquetting multicomponent solid fuel [6], such a disadvantage as high humidity, is a technological necessity, which is more an advantage when using this technology than a technological disadvantage. In this case, sewage sludge is a dispersed system. The degree of dispersion, which ranges from 10 to 107 cm⁻¹, allows the sediments to be considered as colloids with increased viscosity. The viscosity of heterogeneous masses, in particular sewage sludge, has not yet been studied due to the exceptional variety of phenomena and the complexity of the issue. However, it can be argued that on the basis of the data obtained from the complex of studies carried out by the authors, during which it has been revealed that WWS, having a high viscosity and high heat of combustion [7, 8] can be effectively applied in multicomponent briquetting. At the same time, its physical state and characteristics allow the sludge to be used both as a binder component and as a filler in fuel.

Mechanically dewatered sludge contains 65–80 % water. After thermal drying, the calorific value can reach 9–6 MJ/kg, and the processing of 1 ton of WWS (calculated on dry weight) makes it possible to obtain, depending on the composition, 531–556 kg of standard fuel [7]. Taking into account the Republic-wide volume of previously accumulated sewage sludge and the growing need for their processing, one of the ways to utilize this waste may be the production of boiler and furnace fuel for local heat supply systems.

The production of such fuel is achieved by using the developed technologies of multicomponent briquetting, which is called multicomponent solid fuel (MSF) [5–7, 9, 10].

Fig. 3 shows a schematic process flow diagram of multicomponent briquetting using sewage sludge and plant-wood waste.

The technology for producing MSF is based on wet briquetting of multicomponent mixtures with the use of binding components or materials that provide, in the composition of the briquetted mixture, the processes of combining small uncoupled particles into large structural compounds with the required geometric and mechanical parameters and the necessary energy properties. In this case, the wastewater sludge in MSF briquetting acts as a binder, but if necessary, a specialized binder can be used to provide additional physical characteristics specified during briquetting.

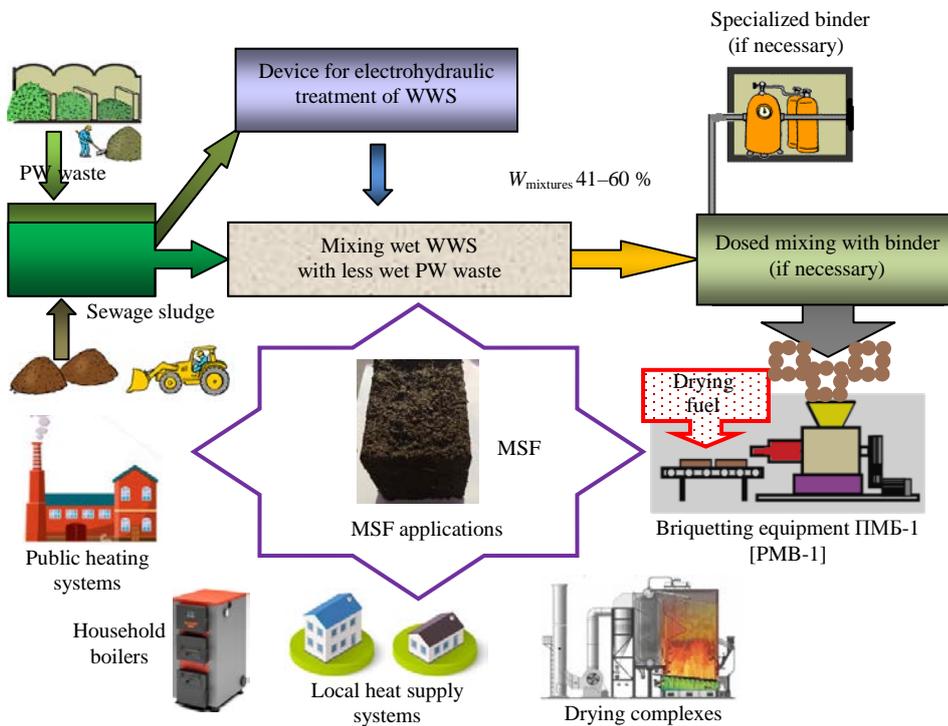


Fig. 3. Principal technological scheme of multicomponent solid fuel production using sewage sludge by the method of continuous briquetting of wet multicomponent compositions

The principal technological scheme of multicomponent briquetting is the use of various crushed combustible waste of plant and wood origin. These, as a rule, include waste of woodworking, logging, husk, fire, etc. In most of the developed multicomponent compositions, they are both the basic component, to which other types of combustible waste can be added in a certain (investigated) ratio, and auxiliary, i.e. its addition provides a reduction in certain indicators in the fuel in general. For example, ash content, sulfur content, etc. decreases. At the same time, it is possible to add in the developed compositions of multicomponent fuel, such combustible components that have not found technological application, such as spent oil-containing sorbents, fuel and oil filter elements, sawdust and rags saturated with oil products, sewage sludge from treatment facilities, animal and poultry waste, municipal waste, etc. An important condition for their use is a certain technological cycle for the preparation of these materials, which we will consider separately.

Depending on the composition, morphological state and moisture content of the waste entering for processing, as well as taking into account their priority ratio in the prepared briquetted mixture, the most technically simple and economically justified system for obtaining the required moisture content of the mixed components of the mixture is used [11]. The moisture content after the preparation process is the most critical technological cycle, which further ensures the maximum productivity of the briquetting equipment and the formation of a static wet frame of the fuel supplied for drying. At the same time,

the optimally selected ratio of components and the moisture content of the composition solves many technological problems, the main of which are:

- the intensity of adsorption of wet components with briquetted particles with the formation of a thin film of the binder on the surface;
- high-quality formation of the surface, shape, density and required standard sizes of briquettes;
- the ability to regulate the heat of combustion (using oil-containing components, organic and combined binders);
- creation of the required intensity of hardening and strength of the briquette during drying.

The multicomponent compositions of MSF developed to date with the use of various wastes ensure complete combustion of the combustible materials used in it with the release of specified thermal and technical characteristics. At the same time, the requirements of transportation and storage are met, ensuring the preservation of the properties and quality characteristics of the combustible mass [3, 5, 12].

Determination of the main physical and chemical indicators of the compositions of briquetted fuel in order to obtain the optimal component parameters have been carried out with the participation of the accredited laboratory “Scientific Research Institute of Physical and Chemical Problems” of the Belarusian State University.

Taking into account the problems of the need for the preferential use of sewage sludge and the determination of the optimal component composition of fuel briquettes with due account of the requirements that ensure the standardization of indicators for so-lid fuel, four intermediate compositions have been developed to determine the ranges and ratios of the chemical composition of the corresponding optimal quality, suitable for use in economic activities at Utility Production Unitary Enterprise “Gomelvodokanal” with the possibility of being burnt in boilers of the existing industrial boiler house.

The main results of experimental studies in accordance with the developed grades of briquetted fuel are summarized and in the form of a comparison in respect of indicators pertaining to the content of carbon, hydrogen, nitrogen, oxygen and sulfur in the working composition of the fuel are presented in Tab. 3.

Table 3

Change in elemental composition of combustible mass of various fuel grades while using wastewater sludge

Type of fuel	Working composition of fuel (by mass), %				
	C	O	H	N	S
MSF of WWS containing wood waste 50 %	40.3	34.0	5.3	1.77	0.62
MSF of WWS containing wood waste 25 %	39.4	24.6	5.4	2.24	1.09
MSF of WWS without wood waste	40.4	12.7	5.7	2.38	1.18
MSF of WWS containing wood waste 67 %	43.4	31.1	5.6	1.66	0.54

In addition, a study on the shape dependence of the briquetted component composition on the productivity of the installation has been carried out. In the

course of the experiment, the female die shapes of the press working channel have been changed in order to determine their influence on the productivity and quality indicators, as well as the optimal conditions for packing and transporting the resulting briquettes. In experimental studies, dies having the shape of a square, a circle and a square with rounded edges have been used.

In turn, tests and calculations have been also carried out to determine the density of dried samples of briquetted solid fuel, for which we used randomly selected briquettes-samples with a length of 200 mm, dried to a moisture content of 10.4 %. The error of instrumental dimension measurements of the samples was ± 0.1 mm.

One of the important performance indicators of fuel is its heat of combustion. A comparative analysis of the calorific value of solid fuels and multicomponent fuels using WWS of urban wastewater treatment plants is presented in the form of a diagram in Fig. 4.

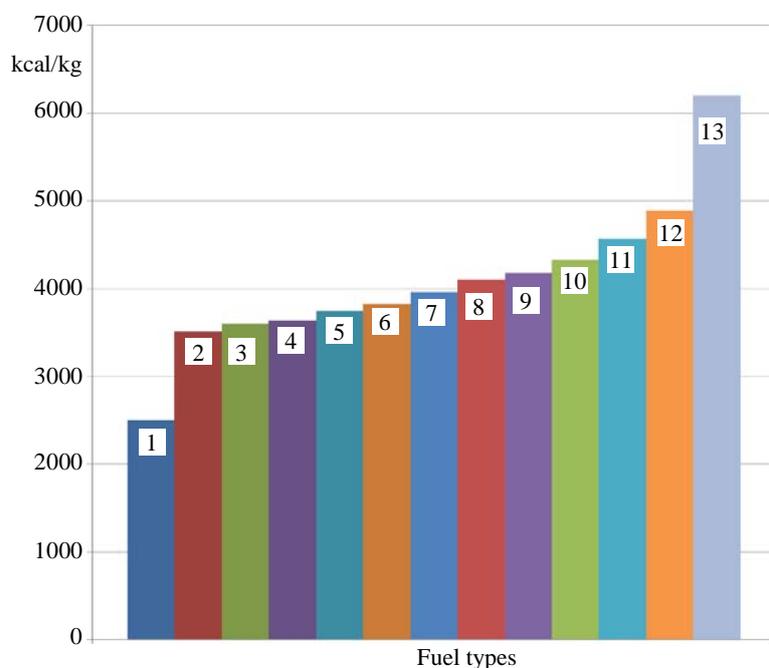


Fig. 4. Diagram comparing the calorific value of various solid fuels with multicomponent solid fuel using sewage sludge: 1 – fire wood (round timber), water content $W = 15$ %; 2 – multicomponent solid fuel (with WWS 33 %), $W = 15$ %; 3 – peat briquette with W not more than 16 %; 4 – multicomponent solid fuel (with WWS 25 %), $W = 15$ %; 5 – multicomponent solid fuel (with WWS 50 %), $W = 15$ %; 6 – multicomponent solid fuel (with WWS 25 %), $W = 15$ %; 7 – wood chips, $W = 10.4$ %; 8 – fuel briquette RUF, $W = 12$ %; 9 – brown coal of B-2-rank, $W = 15$ %; 10 – multicomponent solid fuel (with oil sludge 100 %), $W = 15$ %; 11 – fuel pellets, $W = 7.7$ %; 12 – fuel briquette Pinykey, $W = 9$ %; 13 – coal anthracite of AM-rank

According to the data obtained, we note a clear advantage in terms of calorific value, since according to this characteristic, fuel obtained using sewage sludge, in various ratios, has a calorific value significantly higher than wood

fuel. Also, in terms of calorific value, fuel used in WWS in a ratio of 25, 50 and 100 % exceeds the calorific value of peat fuel. At the same time, the difference in the heat of fuel combustion using in the WWS composition in the ratio of 100 and 50 % is 135–350 kcal/kg, respectively, from fuel chips and fuel briquettes of the RUF type. Accordingly, the obtained values of the MSF combustion heat using WWS differ from the generally accepted compared fuels insignificantly, not exceeding the range of values within 3.3–8.5 %.

Taking into account the obtained results of comparing the heat of combustion, it can be concluded that there is a potential for obtaining alternative energy resources using waste in the form of wastewater sludge from urban structures, which is an urgent state task in solving the problems of waste use.

Comparative analysis of MSF samples has been also tested in other parameters, such as density, strength, water absorption, assessment of emissions of harmful substances from combustion, etc. In the tests, samples of various component compositions have been used, briquetted under the same pressure, but at different humidity, their appearance is shown in Fig. 5.



Fig. 5. Appearance of briquette samples using wastewater sludge

CONCLUSIONS

1. The use of the developed specialized device in certain operating modes of the installation for short-term electrohydraulic treatment of sewage sludge makes it possible to improve the physicochemical characteristics of the composition in the terms of environmental parameters, which allows, after electrohydraulic treatment, to use wastewater sludge in other technologies, including thermal neutralization.

2. Research and comparative analysis of physical and thermotechnical characteristics, has made it possible to find the optimal ratio of components in the fuel composition and to determine that wastewater sludge has a significant energy potential and high energy efficiency indicators of this type of waste, even despite the increased ash content in the working composition of the fuel.

3. The use of optimal, environmentally sound ratios of working compositions of multicomponent solid fuel using wastewater sludge will make it possible to create a stable raw material base for the production of local energy resources with a high energy potential for replacing wood fuel sources, as well as to reduce the amount of wastewater sludge waste storage, which will reduce construction and maintenance costs of new sludge maps and undoubtedly improve the environmental situation in general.

4. The proposed directions for the utilization of wastewater sludge, in addition to the above, correspond to a low-carbohydrate strategy for the further development of the country's economic complex, which is implicitly formed in the context of solving the current tasks of increasing the competitiveness of products and preserving its export.

REFERENCES

1. *Belarus 2030: Government, Business, Science, Education: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference, May 29, 2015, Minsk, Belarusian State University*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ., 2015. 146 (in Russian).
2. Vostrova R. N., Makarov D. V. (2012) Production of Fuel Briquettes Based on Sewage Sludge from Urban Wastewater Treatment Plants. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Vodokhozyaistvennoe Stroitelstvo, Teploenergetika i Geoekologiya* [Bulletin of Brest State Technical University. Water Management Construction, Heat Power Engineering and Geoecology], (2), 43–45 (in Russian).
3. Pekhota A. N. (2010) Multicomponent Fuel Based on Wood Waste – One of the Directions for Solving Energy Saving Problems. *Vestnik Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Transporta. Nauka i Transport = Bulletin of BSUT: Science and Transport*, (1), 121–122 (in Russian).
4. Bugaenko L. T., Kuzmin M. G., Polak L. S. (1988) *High Energy Chemistry*. Moscow, Khimiya Publ. 364 (in Russian).
5. Pekhota A. N. (2011) Use of Secondary in the Energy Balance – an Additional Reserve for Energy Saving and Ensuring a Stable Feedstock Fuel Base. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Vodokhozyaistvennoe Stroitelstvo, Teploenergetika i Geoekologiya* [Vestnik of Brest State Technical University. Water Engineering, Heating Engineering and Environmental Geology], (2), 53–55 (in Russian).
6. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Composite Solid Fuel Based on Secondary Combustible Waste. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (4), 18–22 (in Russian).
7. Pekhota A. N. (2020) Investigation of Multicomponent Briquetted Fuel Based on Sewage Sludge from Urban Wastewater Treatment Plants in Gomel and Investigation of Thermotechnical Properties of Briquettes: Research Report. Gomel, Belarusian State University of Transport. 99 (in Russian).
8. Khroustalev B. M., Romaniuk V. N., Pekhota A. N. (2017) On the Issue of Applying the Exergy Method of Thermodynamic Analysis in the Assessment and Development of Energy Use in Industrial Heat Technology. *Energeticheskaya Strategiya [Energy Strategy]*, (1), 50–56 (in Russian).
9. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2017) Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158> (in Russian).
10. Khroustalev B. M., Pekhota A. N., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap (2019) The Use of Oil Filter Elements in Energy-Resource Saving. *Energeticheskaya Strategiya [Energy Strategy]*, (6), 45–49 (in Russian).
11. Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Akeliev V. D., Mikhhalchenko A. A. (2021) Vacuum Pneumatic Transport for Industrial and Utility Components. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 20 (2), 142–149. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-142-149> (in Russian).
12. Khroustalev B. M., Pekhota A. N., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap (2021) Solid fuel Based on Waste of Low-Utilized Combustible Energy Resources. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 20 (1), 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-538-553>

УДК 697:662.99

Эффективность парокомпрессионной трансформации энергетических потоков для теплоснабжения на основе морской воды

В. Д. Петраш¹⁾, В. О. Макаров¹⁾, А. А. Хоменко¹⁾

¹⁾Одесская государственная академия строительства и архитектуры (Одесса, Украина)

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

Реферат. В статье результатами аналитического исследования обоснованы режимные условия высокоэффективного использования температурного потенциала морской воды в теплонасосных системах теплоснабжения зданий с соответствующим улучшением экологических показателей окружающей среды. На основе анализа региональных условий Одесской акватории Черного моря определены исходные параметры и рациональные режимы работы усовершенствованной теплонасосной системы с центральным, децентрализованным либо локальным догревом абонентского энергоносителя. Показателями оценки эффективности теплонасосных систем в исследовании приняты коэффициент преобразования энергетических потоков, удельные затраты внешней энергии на привод компрессора и циркуляционного насоса охлаждаемой воды в работе теплонасосной установки. На протяжении всего отопительного периода в качестве исходных рассматривались следующие данные: температура воды на входе в испаритель (5–10) °С, на выходе 1 °С; расчетный перепад температур теплоносителя в системе отопления (50–40) °С, воздуха внутри помещения 20 °С; расчетная температура наружного воздуха (–18) °С. Учитывалось характерное соотношение расходов охлаждаемой морской воды и нагреваемого энергоносителя системы теплоснабжения. Обоснованы условия высокой эффективности работы теплонасосной системы теплоснабжения, при которых действительный коэффициент преобразования превышает сезонное нормированное расчетное и минимальное значения при температуре наружного воздуха (–10) °С в предельных условиях моноэнергетического режима как для новых, так и для реконструируемых зданий. В ходе исследования установлено, что общие удельные затраты внешней энергии на привод компрессора и циркуляцию охлаждаемой воды в работе теплонасосной установки с характерным соотношением водяных эквивалентов даже в предельных условиях моноэнергетического режима эксплуатации системы теплоснабжения при температуре наружного воздуха (–10) °С находятся в диапазоне общепринятых значений ($\bar{w} = 0,28–0,34$).

Ключевые слова: морская вода, парокомпрессионная установка, теплоснабжение, тепловые насосы, коэффициент преобразования, удельный расход энергии, конденсатор, испаритель

Для цитирования: Петраш, В. Д. Эффективность парокомпрессионной 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>

Адрес для переписки

Петраш Виталий Демьянович
Одесская государственная академия
строительства и архитектуры
ул. Дидрихсона, 4,
65029, г. Одесса, Украина
Тел.: +380 63 280-31-01
volmak.03@gmail.com

Address for correspondence

Petrash Vitaliy D.
Odessa State Academy
of Civil Engineering and Architecture
4, Didrihsona str.,
65029, Odessa, Ukraine
Tel.: +380 63 280-31-01
volmak.03@gmail.com

The Efficiency of Vapor Compression Transformation of Energy Flows for Heat Supply Based on the Sea Water

V. D. Petrash¹⁾, V. O. Makarov¹⁾, A. A. Khomenko¹⁾

¹⁾Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)

Abstract. The results of the analytical study substantiated the operating conditions for the highly efficient use of the temperature potential of seawater in heat pump heating systems (HPHS) for buildings a building with correspondingly improved environmental indicators. Based on the analysis of the regional conditions of the Odessa water area of the Black Sea, the initial parameters have been substantiated and rational modes of operation of an improved HPHS with central, decentralized or local heating of the subscriber energy carrier have been determined. As indicators for evaluating the efficiency of the HPHS operation, the conversion factor of energy flows and the specific consumption of external energy for the drive of the compressor and the circulating pump of cooled water in the operation of heat pump units were considered. For seawater in the Odessa water area of the Black Sea during the entire heating period, the following temperatures were considered as initial data for analysis: water at the inlet to the evaporator (5–10) °C, at the outlet (1 °C); calculated temperature difference of the coolant in the heating system (50–40) °C, indoor air (20 °C); estimated outdoor temperature (–18 °C). The characteristic correspondence between the flow rates of the cooled sea water and the heated energy carrier of the heat supply system was taken into account. The prerequisites of high efficiency of the heat pump heat supply system in which the actual conversion coefficient exceeds the seasonal normalized calculated and minimum value at an outdoor temperature of (–10) °C under the limiting conditions of the mono-energy regime for both new and reconstructed buildings were substantiated. In the course of the study, it has been determined that the total specific consumption of external energy for the compressor drive and the circulation of cooled water in the operation of a heat pump unit with a characteristic ratio of water equivalents, even under the limiting conditions of the monoenergetic mode of operation of the heat supply system at an outdoor temperature of (–10) °C, are within the range of generally accepted values ($\bar{w} = 0.28–0.34$).

Keywords: sea water, vapor compression unit, heat supply, heat pumps, transformation coefficient, specific energy consumption, capacitor, evaporator

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 538–553. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-538-553> (in Russian)

Введение

При современном состоянии энерготехнологического комплекса г. Одессы актуальна проблема перспектив развития теплоснабжения.

В [1] приведены результаты исследования теплонасосной системы (ТНС) низкотемпературного отопления на основе использования энергетического потенциала грунтовой воды, установлена рациональная степень ее охлаждения в испарителе при минимальных затратах энергии на привод компрессора теплового насоса (ТН) и на работу циркуляционного насоса. Показано, что при обеспечении оптимальной степени охлаждения воды в испарителе ТН минимальные затраты энергии наиболее существенно возрастают с уменьшением температуры на входе в испаритель и менее существенно увеличиваются с понижением температуры окружающей среды.

В аналогичном исследовании ТНС с водяным контуром грунтового коллектора [2] установлено, что общие затраты энергии в системе отопления значительно уменьшаются с понижением расчетной температуры теплоносителя в системе отопления и растут с понижением температуры окружающей среды и установленного комплекса постоянных величин.

Результаты натурного измерения температуры холодной воды, поступающей из системы централизованного водоснабжения в здания Одесского региона, изложены в [3]. Установлена синусоидальная зависимость сезонного изменения температуры воды со смещением амплитуды на $9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно ее среднегодовой температуры $16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обоснована целесообразность использования энергии холодной воды в качестве низкотемпературного источника для ТНС теплоснабжения интегрированно с теплотой удаляемого вентиляционного воздуха в процессе его предварительного охлаждения. На основе указанного подхода авторами разработана новая ТНС горячего водоснабжения [4], установлена зависимость действительного коэффициента преобразования, позволяющая прогнозируемо анализировать рациональные условия работы абонентских систем, учитывая влияние основных факторов отбора теплоты от низкотемпературного источника энергии.

Морская вода по теплогидравлическим характеристикам является хорошим низкотемпературным источником теплоты для систем централизованного теплоснабжения [5–7], поскольку даже на глубине 20–50 м ее температура находится в пределах $(5\text{--}8)\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. проблем из-за образования льда в большинстве случаев не возникает. Вместе с тем необходимо предотвращать накопление органических отложений внутри трубопроводов и испарителей.

При разработке систем теплоснабжения регламентируется расход воды с предотвращением агрессивного воздействия на оборудование теплонасосных установок (ТНУ), в том числе путем применения вторичного контура [8, 9]. Действительный коэффициент сезонного преобразования не может быть ниже минимально установленного и расчетного значений для соответствующих зданий.

На основе анализа эффективности парокомпрессионных процессов в системах теплоснабжения [10] получена обобщенная зависимость для интегрированного учета коэффициента действительного преобразования энергии и рационального замещения мощности систем абонентского потребления теплоты дополнительным источником. Проведены прогнозируемый анализ влияния переменного режима соотношения тепловых потоков структурных подсистем в процессе эксплуатационного регулирования на изменение общей эффективности энергосбережения с минимизацией затрат на дополнительный источник энергии.

В г. Стокгольме, где продолжительность отопительного периода почти полгода, в 1986 г. была построена ТНС теплоснабжения на основе потенциала морской воды с расчетной температурой $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, мощностью 325 МВт, параллельным соединением отдельных модулей. Система обеспечила 60 %

общей тепловой нагрузки сети централизованного теплоснабжения всего города. Решение указанной задачи рассматривалось также в многочисленных работах с применением различных подходов [5, 6, 11–13].

Особенности и условия эффективного использования морской воды в качестве низкотемпературного источника теплоты приведены в [6, 11] на примере совершенствования системы теплоснабжения г. Стокгольма. Теплонасосные станции оборудованы 13 параллельно соединенными модульными теплонасосными агрегатами, каждый мощностью 25 МВт, с электрическими турбокомпрессорами; модули расположены на баржах в заливе моря. В [11] анализируется не только развитие системы централизованного теплоснабжения, но и ее совмещение в единый производственный комплекс с системой централизованного охлаждения зданий в летний период. Особо интересен опыт интеграции распространенных независимых индивидуальных поставщиков пароконденсационной генерируемой теплоты в единую систему центрального теплоснабжения города как в обратную линию, так и в магистраль подачи. Все это положительно отразилось на экологизации системы городского теплоснабжения г. Стокгольма.

Наряду с мероприятиями по повышению эффективности использования энергии до 20 %, программой [6] предусмотрено полное прекращение применения углеводородного топлива для теплоснабжения зданий путем широкого внедрения альтернативных источников энергии.

В [5, 13] отмечается, что в производстве теплоты следует комплексно использовать различные средства генерации теплоты с последующим внедрением теплонасосных технологий. Интересен тот факт, что система централизованного теплоснабжения (2800 км) функционально объединяет также систему центрального охлаждения зданий (300 км) в теплый период года.

Таким образом, для решения проблемы повышения эффективности энергосбережения и экологизации центрального теплоснабжения г. Одессы необходимо развивать следующие направления:

- замещение традиционного топлива энергией возобновляемых и вторичных низкотемпературных источников с широким применением ТН с возможностью существенного улучшения экологических показателей систем теплоснабжения и окружающей среды;

- применение в городских системах центрального теплоснабжения мощных ТНУ исходя из положительной практики их использования в г. Стокгольме для энергосбережения при обеспечении теплотой абонентов жилищного фонда;

- использование в разработке перспективных инвестиционных проектов государственно-частного партнерства стокгольмского опыта подключения независимых индивидуальных поставщиков теплоты на основе теплонасосных технологий к системам централизованного теплоснабжения, что позволит утилизировать имеющийся потенциал многочисленных низкотемпературных источников энергии.

Цель настоящей статьи – обоснование региональных исходных параметров и последующее аналитическое исследование в поиске энергоэф-

фективных теплотехнологических режимов работы предложенных систем теплоснабжения зданий г. Одессы на основе парокомпрессионной трансформации энергии располагаемого температурного потенциала морской воды.

Анализ исходных данных

Температурный режим воды в прибрежной зоне северо-западной части Черного моря детально проанализирован в [14] на основе результатов более 115-летних сезонных и месячных измерений с поиском причин роста ее температуры в условиях глобального потепления климата за последние десятилетия. Отмечено, что на температуру воды в рассматриваемой акватории влияют ее северо-западное расположение по отношению к другим районам моря, мелководность прибрежной зоны, водные потоки Днестра, Дуная и Днепра, а также глубоководная гидродинамика и ветровые воздействия.

На всем протяжении этой прибрежной зоны самая низкая температура воды отмечается в январе – феврале в согласующихся условиях с имеющимся минимумом температур наружного воздуха. Минимальные среднемесячные температуры воды на уровне $(-0,9)–(1,1)$ °С отмечались в Одесском заливе в период суровых зим 1940–1950-х гг. В последние десятилетия в условиях теплых зим в северных частях побережья в декабре – феврале среднемесячные температуры воды составляли $(4,0–5,6)$ °С, а максимальные значения достигали $(6,0–11,0)$ °С. Таким образом, в расчетно-аналитических исследованиях энергетической эффективности работы ТНС теплоснабжения логично рассматривать изменение температуры морской воды Одесской акватории в диапазоне $(5,0–10,0)$ °С за отопительный период.

Для районного теплоснабжения зданий, расположенных непосредственно у береговой зоны, кроме температурного уровня морской воды как источника низкопотенциальной теплоты следует учитывать еще и ее коррозионную активность, а также характеристики теплообменного оборудования. Особенность выбора вариантов структурно-функционального устройства систем с антикоррозийной защитой оборудования при отборе теплоты из морской воды заключается в следующем. В случае применения традиционного теплообменного оборудования предусматривают схемы с устройством промежуточного контура, например из пластиковых труб, заполненных водой с 20%-м раствором гликоля [15], прокладку которого осуществляют в прибрежной акватории на глубине до 4–5 м с дюкерными пригрузами. Также практикуются варианты отбора теплоты по схемам компактно разложенных или развернутых бухт труб, погруженных в водоем, с предварительно определенной их длиной. Более энергоэффективный и вместе с тем дорогостоящий вариант – применение специального оборудования с антикоррозийной защитой испарителей (используется в системах теплоснабжения зданий в странах Балтийского региона). Выбор варианта базируется на результатах оценки энергетической и технико-экономи-

ческой эффективности оборудования с учетом практического опыта его эксплуатации и надежности работы.

Из сопоставления климатических условий и региональных температурных уровней воды в близлежащем бассейне Балтийского моря до г. Стокгольма [5, 11, 13] и северо-западной акватории Черного моря [14, 16] следует, что морская вода Одесского залива на глубине до 3–5 м отличается повышенным потенциалом и возможностями низкотемпературной теплоты, благодаря чему может более эффективно использоваться в парокомпрессионных системах теплоснабжения. В осенний и весенний интервалы переходного отопительного периода в последние десятилетия наблюдается многофакторная взаимосвязь повышения температуры морской воды относительно аналогичных значений в зимних условиях с амплитудным снижением на (5–12) °С относительно среднесуточной температуры наружного воздуха. Закономерно, что температура морской воды в начале и конце отопительного периода достигает (9–14) °С и характеризуется повышенной энергетической возможностью для использования в рассматриваемых системах теплоснабжения зданий.

Структурно-функциональное устройство системы

Одна из обобщенных схем системы теплоснабжения с использованием энергетического потенциала морской воды в процессе парокомпрессионной трансформации энергетических потоков с отбором теплоты для условий как централизованного, так и децентрализованного догрева воды в дополнительном источнике энергии (ДИЭ) с преимущественным применением его в бивалентно-последовательном режиме догрева энергоносителя для абонентских подсистем представлена на рис. 1.

Структурно-функциональное устройство подсистем энергоснабжения сочетает контур теплового насоса парокомпрессионного типа и систему низкотемпературного панельно-лучистого отопления с подсистемой горячего водоснабжения. Тепловой насос включает замкнутый трубопроводный контур с низкотемпературным рабочим телом, последовательно объединяющий испаритель, компрессор, конденсатор и дроссельный вентиль.

Система горячего водоснабжения с последовательным нагревом холодной воды в теплообменниках Т1, Т2 и в ДИЭ обеспечивает необходимую ее температуру согласно установленным требованиям.

В качестве ДИЭ с догревом воды для покрытия пиковых тепловых нагрузок при температурах наружного воздуха ниже бивалентной точки применяют нагреватели, которые легко поддаются автоматизации работы, в частности газовые либо электрические догреватели и теплогенераторы. Они устанавливаются в основном последовательно для возможности дальнейшего догрева воды до необходимой температуры согласно графику эксплуатационного регулирования системы в бивалентном режиме. Их установка может быть центральной с совмещенным устройством с теплонасосной станцией или с местным и децентрализованным догревом воды непосредственно в структуре систем абонентского потребления теп-

лоты. Из возможных принципиальных схем теплонасосного теплоснабжения выбирают наиболее оптимальный вариант для региональных условий с оценкой результатов технико-экономических показателей и практического опыта.

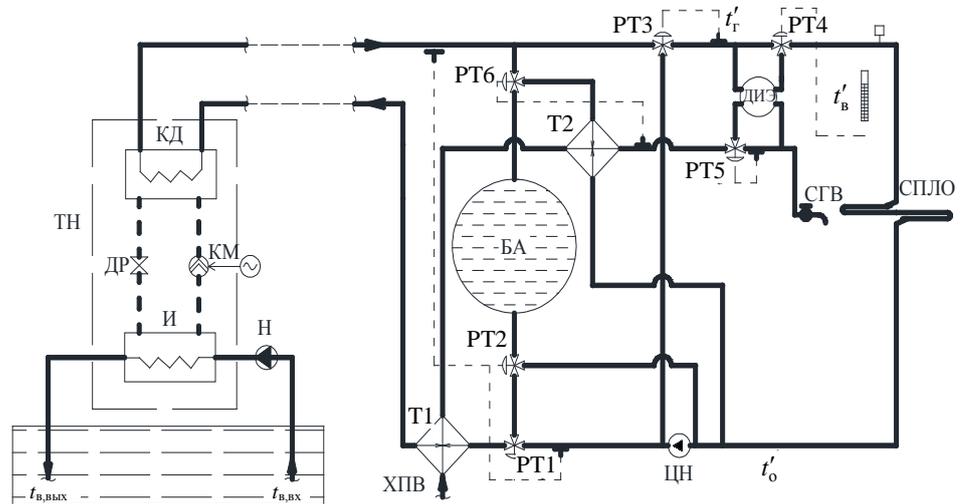


Рис. 1. Принципиальная схема теплоснабжения на основе энергии морской воды: ТН – тепловой насос; И – испаритель; КД – конденсатор; Т1, Т2 – теплообменник; БА – бак-аккумулятор; КМ – компрессор; ДР – дроссельный вентиль; Н – насос; СПЛО – система панельно-лучистого отопления; ЦН – циркуляционный насос; ДИЭ – дополнительный источник энергии; РТ1–РТ6 – температурный регулятор расхода теплоносителя; ХПВ – хозяйственно-питьевой водопровод; СГВ – система горячего водоснабжения; $t_{в,вх}$ – температура энергоносителя на входе в испаритель, °С; $t_{в,вых}$ – то же на выходе из испарителя, °С; $t'_г$, $t'_о$ – начальная и конечная текущие температуры энергоносителя в системе теплоснабжения при соответствующей температуре наружного воздуха на протяжении отопительного периода, °С; $t'_в$ – температура внутри помещения, °С

Fig. 1. Schematic diagram of heat supply based on seawater energy: ТН – heat pump; И – evaporator; КД – capacitor; Т1, Т2 – heat exchanger; БА – storage tank; КМ – compressor; ДР – throttle valve; Н – pump; СПЛО – radiant panel heating system; ЦН – circulation pump; ДИЭ – an additional source of energy; РТ1–РТ6 – temperature regulators of the coolant flow rate; ХПВ – utility and drinking water supply; СГВ – hot water system; $t_{в,вх}$ – evaporator inlet temperature, °С; $t_{в,вых}$ – evaporator outlet temperature, °С; $t'_г$, $t'_о$ – the initial and final current temperatures of the energy carrier in the heat supply system at the corresponding outdoor temperature during the heating period, °С; $t'_в$ – indoor temperature, °С

Описание теплообменного процесса

В рассматриваемой системе вода с расходом $G_{и}$ и температурой на входе $t_{в,вх}$ насосом подается в испаритель ТН, где охлаждается до температуры $t_{в,вых}$ на выходе. Для компенсации потребляемой теплоты соответствующими абонентскими системами $Q_{овг}$ используется тепловой поток конденсатора $Q_{к}$ ТН с температурой теплоносителя $t_{к}$, которая является начальной температурой воды на входе в систему отопления $t_{г}$.

Для анализа энергетической эффективности парокомпрессионной системы теплоснабжения действительный коэффициент преобразования определяется из соотношения [17–19]

$$\varphi = \frac{Q_k}{W_k}, \quad (1)$$

где W_k – внешняя приводная энергия в работе компрессора, тепловой эквивалент которой [18] в работе ТН определяется согласно энергетическому балансу

$$W_k = Q_k - Q_n, \quad (2)$$

где Q_n – мощность теплового потока, который отбирается от низкотемпературного источника энергии.

Расчетная мощность компрессора определяется общей потребностью абонентского потребления теплоты $Q_{\text{овг}}$

$$Q_k = Q_{\text{овг}} = G_r c_r (t'_r - t'_o), \quad (3)$$

где G_r – расход теплоносителя в системе теплоснабжения, кг/с; c_r – средняя удельная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°С);

Мощность испарителя ТН с устройством промежуточного контура для отбора теплоты морской воды (например, водного раствора пропиленгликоля) [20, 21] с теплоемкостью c_b может быть определена как

$$Q_n = G_n c_b (t_{b, \text{вх}} - t_{b, \text{вых}}). \quad (4)$$

С учетом взаимосвязи энергетических потоков (2)–(4) низкотемпературного источника и энергоносителя системы абонентского потребления теплоты уравнение для определения действительного коэффициента преобразования [19, 22] приобретает следующий вид:

$$\varphi = \left[1 - \frac{G_n c_b (t_{b, \text{вх}} - t_{b, \text{вых}})}{G_r c_r (t'_r - t'_o)} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где G_n – расход воды через испаритель, кг/с.

Известно, что для рекомендуемых двухтрубных низкотемпературных систем (для обеспечения рациональных условий их качественного эксплуатационного регулирования в течение отопительного периода), прежде всего с панельно-лучистым отоплением с характерной для них повышенной теплогидравлической устойчивостью, температура теплоносителя в подающей магистрали t'_r и обратном трубопроводе t'_o определяется известными зависимостями из [23, 24]. Для указанных условий зависимость разности температур горячего и охлажденного энергоносителя в системе отопле-

ния в процессе эксплуатационного регулирования [23] имеет следующую взаимосвязь:

$$t'_r - t'_o = (t_r - t_o) \left(\frac{t_b - t'_n}{t_b - t_n} \right)^{0,5}, \quad (6)$$

где t_r , t_o – начальная и конечная расчетные температуры энергоносителя в системе теплоснабжения, °С; t_b – расчетная температура внутреннего воздуха, °С; t_n , t'_n – расчетная и текущая температуры наружного воздуха, °С.

С учетом (6) эффективность парокомпрессионной трансформации энергетических потоков в теплонасосной системе дополнительно учитывается в уравнении действительного коэффициента преобразования (5) в зависимости от переменной температуры наружного воздуха

$$\varphi = \left(1 - \bar{G} \frac{(t_{b,вх} - t_{b,вых})}{(t_r - t_o) \left(\frac{t_b - t'_n}{t_b - t_n} \right)^{0,5}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где \bar{G} – соотношение водяных эквивалентов расходов морской воды $G_{и}$ и энергоносителя в системе отопления G_r при $c_b \approx c_r$.

Анализ результатов расчетов

Зависимость действительного коэффициента преобразования в низкотемпературной системе отопления от температуры наружного воздуха согласно (7) иллюстрируется графиками, представленными на рис. 2. С учетом анализа гидрометеорологического изменения температуры морской воды в Одесской акватории на протяжении всего отопительного периода в качестве исходных данных для системы отопления приняты следующие температуры: $t_{b,вх} = 5,0$ (7,5, 10,0) °С; $t_{b,вых} = 1$ °С; $t_r = 50$ °С; $t_o = 40$ °С; $t_b = 20$ °С; $t_n = -18$ °С. Соотношение охлаждаемой воды и энергоносителя в системе теплоснабжения – в пределах $G_{и}/G_r = 1,0-1,5$, что характерно для современных ТН серийного производства [20, 21].

В результате исследований установлено, что морская вода Одесской акватории является высокоэффективным низкотемпературным источником энергии для теплоснабжения зданий в условиях обоснованного использования ДИЭ для последующего догрева воды в бинарно-последовательном режиме. Кроме того, анализ температуры морской воды при соответствующей температуре наружного воздуха в отопительный период показывает, что в парокомпрессионном теплоснабжении значение действительного коэффициента преобразования энергетических потоков больше

нормативно установленных минимальных и расчетных значений $\varphi_{\min} = 3,8$ и $\varphi_p = 4,2$ для новых и реконструируемых подсистем [9], которые обеспечиваются даже при существенном снижении температуры наружного воздуха до $t_n = -10$ °C. Дальнейшее снижение t_n обуславливает рабочий режим системы теплоснабжения с центральным, децентрализованным или индивидуальным догревом энергоносителя в системах отопления с использованием ДИЭ в соответствии с графиком их оптимального эксплуатационного регулирования. Таким образом, работа усовершенствованной системы теплоснабжения энергоэффективна и рациональна для практического внедрения с соблюдением режимных условий эксплуатации с расчетной бивалентной температурой наружного воздуха $t'_n = -10$ °C.

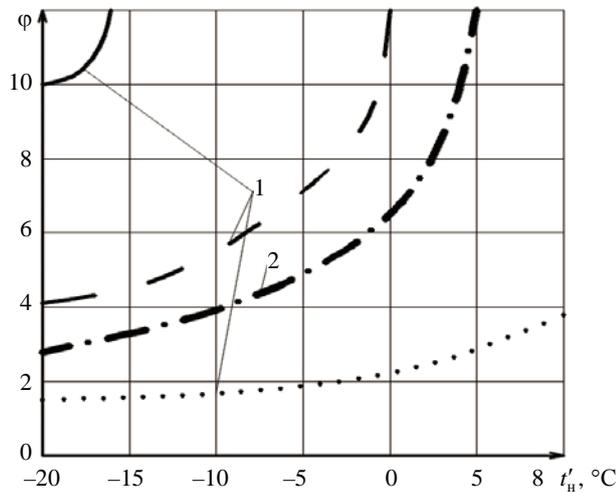


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования в системе теплоснабжения от температуры наружного воздуха: 1 – $\bar{G} = 1,0$ (— — $t_{b,vx} = 10,0$ °C; — — — $t_{b,vx} = 7,5$ °C; ••• — $t_{b,vx} = 5,0$ °C); 2 – $\bar{G} = 1,5$ (—•— — $t_{b,vx} = 5,0$ °C)

Fig. 2. Dependence of the conversion factor in the heat supply system on the outside air temperature: 1 – $\bar{G} = 1,0$ (— — $t_{b,vx} = 10,0$ °C; — — — $t_{b,vx} = 7,5$ °C; ••• — $t_{b,vx} = 5,0$ °C); 2 – $\bar{G} = 1,5$ (—•— — $t_{b,vx} = 5,0$ °C)

Для определения оптимальных режимов работы теплового и циркуляционного насосов, обеспечивающих прохождение охлаждаемой воды через испаритель, проанализируем удельные затраты энергии и термодинамическое совершенство работы ТНУ в системе теплоснабжения [17, 19].

Зависимость затрат энергии на привод компрессора от установленного значения действительного коэффициента преобразования энергетических потоков согласно (7) и тепловой мощности испарителя $Q_{и}$ приобретает следующий вид [1, 16]:

$$W_k = \frac{Q_{и}}{\varphi - 1}. \quad (8)$$

Затраты энергии на работу насоса, обеспечивающего циркуляцию морской воды через испаритель ТН, определяются согласно уравнению

$$W_H = \frac{G_H \Delta P}{\rho_v \eta_H \eta_{np}}, \quad (9)$$

где W_H – дополнительная мощность внешнего привода водяного насоса в работе системы теплоснабжения с ТНУ; ΔP – суммарные потери давления в испарителе и трубной части системы отбора теплоты из охлаждаемой воды, Па; ρ_v – плотность охлаждаемой среды, кг/м³; η_H , η_{np} – КПД насоса и его привода.

На основе установленных составляющих затрат энергии для работы компрессора (8) и обеспечения насосной циркуляции морской воды (9) зависимость общего удельного расхода энергии в работе системы теплоснабжения мощностью $Q_k = Q_{обг}$ запишется в виде

$$\bar{w}_{об} = \frac{W_k + W_H}{Q_k}. \quad (10)$$

На рис. 3 представлена графическая интерпретация изменения общего удельного расхода внешней приводной энергии $\bar{w}_{об}$ от температуры наружного воздуха t'_H в течение отопительного периода согласно (8)–(10). В качестве исходных данных для реальных условий соотношения расходов энергоносителей [2, 20, 21] и действительных температур в низкотемпературной системе теплоснабжения приняты: $\bar{G} = 1,0$ – $1,5$; t_r , $t_o = (50$ – $40)$ °C; $t_{b,вх} = 5,0$ ($7,5$) °C; $\Delta P_b = 50$ кПа; $\eta_H = 0,8$; $\eta_{np} = 0,96$.

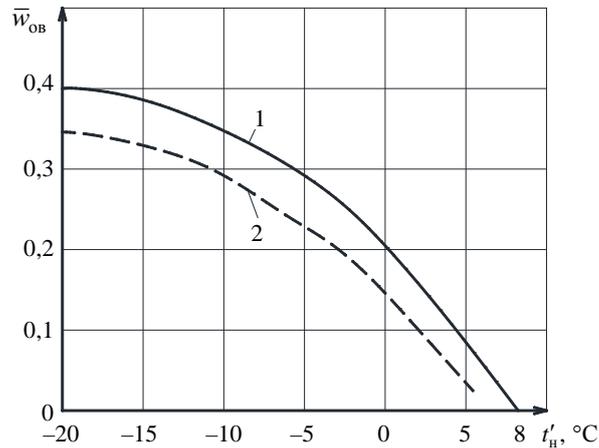


Рис. 3. Зависимость удельного расхода общей энергии на привод компрессора и работу циркуляционного насоса от температуры наружного воздуха:

1 – $\bar{G} = 1,5$, $t_{b,вх} = 5,0$ °C; 2 – $\bar{G} = 1,0$, $t_{b,вх} = 7,5$ °C

Fig. 3. Dependence of the specific consumption of total energy for the compressor drive and the operation of the circulation pump on the outside air temperature:

1 – $\bar{G} = 1.5$, $t_{b,вх} = 5.0$ °C; 2 – $\bar{G} = 1.0$, $t_{b,вх} = 7.5$ °C

Из анализа графических зависимостей (рис. 3) следует, что работа рассматриваемой системы теплоснабжения даже в предельных условиях моноэнергетического режима при температуре наружного воздуха $t_n = -10$ °С с реальным соотношением водяных эквивалентов $\bar{G} = 1,0-1,5$ характеризуется удовлетворительными общими удельными затратами внешней энергии ($\bar{w}_{об} = 0,28-0,34$), необходимой для привода компрессора и работы циркуляционного насоса для перемещения охлаждаемой воды.

Известно [17, 19], что термодинамическое совершенство ТН как один из показателей энергетической эффективности его работы определяется соотношением

$$\eta_e = \frac{\Phi}{\Phi_k}, \quad (11)$$

где Φ_k – теоретический коэффициент трансформации ТН согласно циклу Карно, определяемый как [17–19]:

$$\Phi_k = \frac{T_k}{T_k - T_n} = \left[1 - \frac{T + t_{в,вых} - \Delta t_{в,вых}}{T + t'_r + \Delta t_k} \right]^{-1}, \quad (12)$$

где T_k – температура конденсации рабочего тела в конденсаторе ТН, К; T_n – то же испарения рабочего тела в испарителе ТН, К; $\Delta t_{в,вых}$ – разница температур воды и рабочего тела на выходе из испарителя, °С; Δt_k – то же рабочего тела ТН и нагретой воды на выходе из конденсатора, °С.

Температура испарения рабочего тела представляется в виде

$$T_n = 273 + t_{в,вых} - \Delta t_{в,вых}. \quad (13)$$

Температура конденсации рабочего тела, обеспечивающая повышение температуры воды в системе теплоснабжения до необходимого уровня, определяется по зависимости

$$T_k = 273 + t_k + \Delta t_k, \quad (14)$$

где t_k – температура воды на выходе из конденсатора, соответствующая температуре горячей воды на входе t_r в систему отопления, °С.

Для определения термодинамического совершенства η_e использованы исходные данные в ранее выполненном расчете действительных коэффициентов преобразования по (7), а также дополнительные значения $\Delta t_{в,вых} = 5$ °С и $\Delta t_k = 5$ °С.

Сопоставление результатов расчетов по (7) и (12) подтверждает высокую степень термодинамического совершенства η_e в процессе парокомпрессионной трансформации энергетических потоков в усовершенствованной системе теплоснабжения. В частности, в предельных условиях моноэнергетического режима работы при температуре наружного возду-

ха $t_n = -10$ °С η_e находится в пределах 0,53–0,66 соответственно при температурах морской воды $t_{в,вх} = 5$ °С ($\bar{G} = 1,5$) и $t_{в,вх} = 7,5$ °С ($\bar{G} = 1,0$).

Представляет интерес дальнейшее совершенствование ТНС на основе предложенного подхода [24] с использованием энергии ветровых потоков для автономного применения в ТНУ.

ВЫВОДЫ

1. Представлены исходные параметры и определены рациональные режимы работы теплонасосных систем теплоснабжения с центральным либо децентрализованным и локальным догревом абонентского энергоносителя в предельных условиях бивалентного режима при температуре наружного воздуха ниже (-10) °С.

2. Обоснованы условия высокой энергетической эффективности работы теплонасосной системы теплоснабжения, при которых действительный коэффициент преобразования превышает сезонное нормированное расчетное и минимальное значения при рациональной температуре наружного воздуха $t_n = -10$ °С в моноэнергетическом режиме работы (соответственно $\phi_{\min} = 3,8$, $\phi_p = 4,2$) как для новых, так и для реконструируемых зданий. Указанные результаты существенно превышают аналогичные показатели систем теплоснабжения г. Стокгольма.

3. Общие удельные затраты внешней энергии на привод компрессора и циркуляцию охлаждаемой воды в работе теплонасосной установки с характерным соотношением водяных эквивалентов даже в предельных условиях моноэнергетического режима эксплуатации системы теплоснабжения при $t_n = -10$ °С находятся в диапазоне общепринятых значений ($\bar{w} = 0,28$ – $0,34$). При этом термодинамическое совершенство теплонасосной установки в работе системы теплоснабжения в условиях обоснованного режима при $t_n = -10$ °С характеризуется удовлетворительными показателями в пределах $\eta_e = 0,53$ – $0,66$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродний, М. К. Про умови оптимальної роботи теплового насоса в низькотемпературних системах опалення з використанням теплоти природної води / М. К. Безродний, Н. О. Притула // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2011. № 2. С. 11–16.
2. Безродний, М. К. Оптимальна робота теплового насоса в низькотемпературних системах опалення з використанням теплоти ґрунта / М. К. Безродний, Н. О. Притула // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2012. № 1. С. 7–12.
3. Высоцкая, М. В. Холодная вода как низкотемпературный источник для теплонасосных систем теплохладоснабжения зданий / М. В. Высоцкая // *Энергоэффективность в строительстве и архитектуре*. Киев: КНУБА, 2015. Вып. 7. С. 41–46.
4. Петраш, В. Д. Система теплохолодopостачання на базі інтегрованої енергії холодної води та повітряних потоків з пневмогiдравлічною стабілізацією термотрансформаторних

- процесів: пат. 109848 України, МПК (2015.01), F24F 5/00 / В. Д. Петраш, М. В. Висоцька, О. А. Поломанний. № а201407374. Опубл. 12.12.2015.
5. Johansson, P.-O. Buildings and District Heating – Contributions to Development and Assessments of Efficient Technology [Electronic Resource]. Lund University. 2011. Mode of access: https://www.ees.energy.lth.se/fileadmin/energivetenskaper/Avhandlingar/POJ_thesis_20110510_final_all.pdf. Date of access: 13.09.2020.
 6. Strategy for a Fossil-Fuel Free Stockholm by 2040 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://international.stockholm.se/globalassets/rapporter/strategy-for-a-fossil-fuel-free-stockholm-by-2040.pdf>. Date of access: 13.09.2020.
 7. Васильев, Г. П. Анализ перспектив использования тепловых насосов в Украине [Электронный ресурс] / Г. П. Васильев // ЭСКО. 2007. № 3. Режим доступа: <https://insolar.ru/o-nas/publikatsii-i-otzyvy/nashi-stati-i-publikatsii-v-presse/analiz-perspektiv-ispolzovaniya-ter-lovykh-nasosov-v-ukraine>. Дата доступа: 13.09.2020.
 8. Heating Systems in Buildings – Design of Heat Pump Heating Systems: BS EN 15450:2007. Int. 01.12.2007. European Standart, 2007. 39 p.
 9. Проектирование систем отопления зданий с тепловыми насосами: ДСТУ Б В.2.5-44:2010. Введ. 19.12.2011. Киев: Минрегионстрой Украины, 2010. 56 с.
 10. Интегрированный учет коэффициентов преобразования и замещения мощности абонентского теплотребления в разработке парокомпрессионных систем теплоснабжения / В. Д. Петраш [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2015. № 4. С. 76–79.
 11. Зимаков, А. В. Опыт Швеции по экологизации системы городского центрального теплоснабжения на примере ТЭЦ «Вяртаверкет» / А. В. Зимаков // Жилищные стратегии. 2018. Т. 5, № 3. С. 383–398.
 12. Степанов, О. А. Система централизованного теплоснабжения с применением тепловых насосов / О. А. Степанов, П. А. Третьякова // Вестник Тюменского гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1, № 4. С. 43–51.
 13. Large Heat Pumps in Swedish District Heating Systems / H. Averfalk [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 79. P. 1275–1284. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.135>.
 14. Репетин, Л. Н. Пространственная и временная изменчивость температурного режима прибрежной зоны Черного моря / Л. Н. Репетин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26. С. 99–116.
 15. Гершкович, В. Ф. Особенности проектирования систем теплоснабжения зданий с тепловыми насосами / В. Ф. Гершкович. Киев: Украинская академия архитектуры, 2009. 60 с.
 16. Исследование знакопеременной структуры линейных трендов поверхностной температуры Черного моря / В. Н. Еремеев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 18. С. 236–241.
 17. Мартыновский, В. С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / В. С. Мартыновский. М.: Энергия, 1977. 280 с.
 18. Способы улучшения обработки воды и повышения энергетических характеристик теплового насоса типа «вода – воздух» / Л. Р. Джунусова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 372–380. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-372-380>.
 19. Петраш, В. Д. Теплонасосные системы теплоснабжения / В. Д. Петраш. Одесса: ВМВ, 2014. 556 с.
 20. Документация для планирования и проектирования тепловых насосов Vuderus [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.adeptamasa.com/doc_proect/Logatherm%20WPS_draft.pdf. Дата доступа: 13.09.2020.

21. Документация для проектирования тепловых насосов Viessmann [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.viessmann.ru/ru/zilye-zdania/teplovye-nasosy/mosnye-teplovye-nasosy.html>. Дата доступа: 13.09.2020.
22. Некрасова, О. А. Исследование теплонасосных систем отопления (модельный подход) / О. А. Некрасова, Ю. В. Сияк // Теплоэнергетика. 1986. № 11. С. 30–34.
23. Беленкий, Е. А. Рациональные системы водяного отопления / Е. А. Беленкий. Л.: Госстройиздат, 1963. 208 с.
24. Гречихин, Л. И. Воздушный тепловой насос в ветроэнергетике / Л. И. Гречихин, А. И. Гутковский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 264–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-264-284>.

Поступила 01.03.2021 Подписана в печать 19.05.2021 Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Bezrodny M. K., Prytula N. O. (2011) About the Heat Pump Optimum Operation in the Low-Temperature Heating Systems Using the Natural Water Heat. *Energetika: Ekonomika, Tekhnologi, Ekologiya = Power Engineering: Economics, Technique, Ecology*, (2), 11–16 (in Ukrainian).
2. Bezrodny M. K., Pritula N. O. (2012) Optimum Operation of the Heat Pump in Low-Temperature Heating Systems Using Ground Heat. *Naukovi Visti Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu Ukraini "Kiivs'kii Politekhnicnii Institut" = KPI Science News*, (1), 7–12 (in Ukrainian).
3. Vysotskaya M. V. (2015) Cold Water as a Low-Temperature Source for Heat Pump Systems for Heating and Cooling Buildings. *Energoeffektivnost' v Stroitel'stve i Arkhitekture* [Energy Efficiency in Construction and Architecture]. Kyiv, KNUSA, Iss. 7, 41–46 (in Russian)
4. Petrash V. D., Vysotskaya M. V., Polomanny A. A. (2014) *Heat and Cold Supply System Based on Integrated Energy of Cold Water and Air Flows with Pneumohydraulic Stabilization of Thermal Transformer Processes*. Patent No 109848 of Ukraine (in Ukrainian).
5. Johansson P.-O. (2011) *Buildings and District Heating – Contributions to Development and Assessments of Efficient Technology* [Electronic Resource]. Lund University. Available at: https://www.ees.energy.lth.se/fileadmin/energivetenskap/Avhandlingar/POJ_thesis_20110510_final_all.pdf (Accessed 13 September 2020).
6. *Strategy for a Fossil-Fuel Free Stockholm by 2040* [Electronic Resource]. Available at: <https://international.stockholm.se/globalassets/rappporter/strategy-for-a-fossil-fuel-free-stockholm-by-2040.pdf> (Accessed 13 September 2020).
7. Vasiliev G. P. (2007) Analysis of the Prospects for the Use of Heat Pumps in Ukraine [Electronic Resource]. *ESKO*, (3). Available at: <https://insolar.ru/o-nas/publikatsii-i-otzyvy/nashi-stati-i-publikatsii-v-presse/analiz-perspektiv-ispolzovaniya-teplovyykh-nasosov-v-ukraine> (Accessed 13 September 2020) (in Russian).
8. BS EN 15450:2007. *Heating Systems in Buildings – Design of Heat Pump Heating Systems*. European Standart, 2007. 39.
9. DSTU B B.2.5-44:2010 (EN 15450:2007, MOD) *Design of Heating Systems for Buildings with Heat Pumps*. Kyiv, 2010. 56 (in Ukrainian).
10. Petrasch V. D., Polunin Y. N., Polomanny A. A., Vysockaya M. V. (2015) Integrated Allowing for the Coefficients of Conversion and Replacement of the Power of Consumer's Heat Consumption in Developing Vapor Compression Heat Supply Systems. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo = Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel*, (4), 76–79 (in Russian).
11. Zimakov A. V. (2018) Swedish Experience in Greening the Urban District Heating System on the Example of the “Värtaverket” Thermal Power Plant. *Zhilishchnye Strategii = Russian Journal of Housing Research*, 5 (3), 383–398 (in Russian).

12. Stepanov O. A., Tretyakova P. A. (2015) District Heating System Using Heat Pumps. *Vestnik Tyumenskogo Gos. Un-ta. Fiz.-Mat. Modelirovanie. Neft', Gaz, Energetika = Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 1 (4), 43–51 (in Russian).
13. Averfalk H., Ingvarsson P., Gong M., Persson U., Werner S. (2017) Large Heat Pumps in Swedish District Heating Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1275–1284. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.135>.
14. Repetin L. N. (2012) Spatial and Temporal Variability of the Temperature Regime of the Coastal Zone of the Black Sea. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoi i Shel'fovoi Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Environmental Safety of Coastal and Shelf Zones and Integrated Use of Shelf Resources]. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ. Iss. 26. 99–116 (in Russian).
15. Gershkovich V. F. (2009) *Design Features of Heat Supply Systems for Buildings with Heat Pumps*. Kyiv, Ukrainian Architecture Academy Publ. 60 (in Russian).
16. Ereemeev V. N., Goryachkin Yu. N., Zhukov A. N., Krashennnikova M. A., Sizov A. A. (2009) Study of the Alternating Structure of Linear Trends in the Surface Temperature of the Black Sea. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoi i Shel'fovoi Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Environmental Safety of Coastal and Shelf Zones and Integrated Use of Shelf Resources]. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ. Iss. 18. 236–241 (in Russian).
17. Martynovskii V. S. (1977) *Cycles, Circuits and Characteristics of Thermal Transformers*. Moscow, Energiya Publ. 280 (in Russian).
18. Junussova L. R., Abildinova S. K., Aliyarova M. B., Chicherin S. V., Junussov T. Ja. (2018) The Means to Improve Water Treatment and to Enhance Power Engineering Performance of the Water Source Heat Pump. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 372–380. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-372-380> (in Russian).
19. Petrash V. D. (2014) *Heat Supply Heat Pump Systems*. Odessa, VMV Publ. 556 (in Russian).
20. Buderus (2008). *Documentation for Planning and Design of Heat Pumps. Logatherm WPS 6–11 K and WPS 6–17 Brine-Water Heat Pumps from 6 kW to 17 kW. S.I.* [Electronic Resource]. Available at: http://www.adeptamasa.com/doc_proect/Logatherm%20WPS_draft.pdf (Accessed 13 September 2020) (in Russian).
21. Viessmann (2017) *Basics of Designing Heat Pumps. Design Instruction* [Electronic Resource]. Available at: https://viessmann.academy/disk/docs/equipment/Vitocal/5829_519_05_2017_PA_Vitocal_basic.pdf (Accessed 13 September 2020) (in Russian).
22. Nekrasova O. A., Sinyak Yu. V. (1986) Research of Heat Pump Heating Systems (Model Approach). *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (11), 30–34 (in Russian).
23. Belen'kii E. A. (1963) *Rational Water Heating Systems*. Leningrad, Gosstroizdat Publ. 208 (in Russian).
24. Gretchikhin L. I., Hutkouski A. I. (2020) Air Heat Pump in Wind Power. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 264–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-63-3-264-284> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567>

УДК 627.8.034

Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины

В. В. Веременик¹⁾, В. В. Ивашечкин¹⁾, О. В. Немеровец¹⁾

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

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

Реферат. В Республике Беларусь создано 153 водохранилища. В период прохождения по реке катастрофических паводков и половодий возникает риск переполнения водохранилищ, перелива этих масс через гребень земляной плотины и затопления значительных территорий. Разрушение плотины сопровождается образованием прорана и истечением через него в нижний бьеф неустановившегося потока воды в виде волны прорыва. Волна прорыва и катастрофическое затопление местности являются основными разрушающими факторами гидродинамических аварий. Расчеты по определению параметров волны и оценке возможных последствий затопления необходимы при составлении оперативно-тактических планов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций при авариях на подпорных сооружениях, определении вероятного ущерба от затопления территории в нижнем бьефе гидротехнического сооружения в результате прохождения волны прорыва. Необходимо оценить зону затопления и гидродинамические параметры потока: максимальные значения глубины и скорости потока в зоне катастрофического затопления, время от начала аварии до прихода в данную точку местности прорывной волны, продолжительность затопления, границы зоны катастрофического затопления, гидрограф расхода в створе размываемой плотины и график падения уровня верхнего бьефа. Степень достоверности прогнозных расчетов определяется точностью двух применяемых математических моделей: 1) размыва плотины; 2) движения волны прорыва. Анализ показывает, что для расчета движения волны прорыва во всех случаях применяются гидродинамические модели, основанные на одно- и двумерных уравнениях Буссинеска – Сен-Венана. Параметры волны – ее высота и скорость распространения – полностью зависят от гидрографа расхода в створе размываемой плотины, который, в свою очередь, определяется динамикой ее размыва. Цель исследования – разработка методики расчета затопления нижнего бьефа в результате разрушения грунтовой плотины.

Ключевые слова: расход, паводок, водохранилище, плотина, размыв, проран, перелив, затопление, гидродинамическая авария, волна прорыва, гидрограф расхода

Для цитирования: Веременик, В. В. Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины / В. В. Веременик, В. В. Ивашечкин, О. В. Немеровец // *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>

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Address for correspondence

Ivashchkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Simulation of Unsteady Movement in the Downstream of a Hydroelectric Complex During the Destruction of a Soil Dam

V. V. Veremenyuk¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, O. V. Nemeravets¹⁾

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

Abstract. 153 reservoirs have been created in the Republic of Belarus. During the period of passing catastrophic floods and high waters along the river, there is a risk of overflowing reservoirs, overflow of water masses through the crest of an earthen dam and flooding of significantly large areas. The destruction of the dam is accompanied by the formation of a breach and the outflow through it of an unsteady flow of water in the form of a breakthrough wave into the downstream. A breakthrough wave and catastrophic flooding of the area are the main destructive factors of hydrodynamic accidents. Calculations to determine parameters of the wave and to assess the possible consequences of flooding are necessary when drawing up operational-and-tactical plans for the prevention and elimination of emergencies in case of accidents at retaining structures, determining the probable damage from flooding of the territory in the downstream of a hydraulic structure as a result of the passage of a breakthrough wave. It is necessary to assess the flooding zone and the hydrodynamic parameters of the flow, viz. the maximum values of the depth and velocity of the flow in the zone of catastrophic flooding, the time from the beginning of the accident to the arrival of a breakthrough wave at the particular point of the terrain, the duration of flooding, the boundaries of the zone of catastrophic flooding, the hydrographic flow rate in the section of the eroded dam and the graph of the fall headwater level. The degree of reliability of predictive calculations is determined by the accuracy of the two applied mathematical models, viz.: 1) erosion of the dam; 2) the movement of the breakout wave. The analysis of the applied mathematical models shows that in all cases the hydrodynamic models based on the one- and two-dimensional equations of Boussinesq – Saint-Venant are used to calculate the movement of the breakthrough wave. Wave parameters, i. e. wave height and speed of its propagation, completely depend on the hydrograph of the discharge in the section of the eroded dam, which, in its turn, is determined by the dynamics of its erosion. The aim of the work is to develop a methodology for calculating the flooding of the downstream as a result of the destruction of a soil dam.

Keywords: discharge, flood, water reservoir, dam, erosion, breach, overflow, flooding, hydrodynamic accident, breakthrough wave, hydrograph of the discharge

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567> (in Russian)

Введение

В Республике Беларусь создано 153 водохранилища с общей площадью зеркала 822 км². Полезный объем водохранилищ 1,20 км³, полный объем 2,95 км³. Недавно построены три новых водохранилища (Гродненская, Витебская и Полоцкая ГЭС). При эксплуатации водохранилища возникает ряд проблем, связанных с процессами водообмена [1] и абразией берегов [2], но самую серьезную опасность несет риск переполнения водохранилищ, перелива водных масс через гребень земляной плотины и затопле-

ния значительных территорий при прохождении по реке катастрофических паводков и половодий. Разрушение плотины сопровождается образованием прорана и истечением через него в нижний бьеф неустановившегося потока воды в виде волны прорыва. Волна прорыва и катастрофическое затопление местности – основные разрушающие факторы гидродинамических аварий.

В Республике Беларусь прогнозные расчеты параметров волны прорыва и зон вероятного затопления при разрушении плотин производятся при разработке проектной документации для вновь строящихся и реконструируемых плотин и водохранилищ [3]. Также прогнозные расчеты применяются при разработке оценки воздействия на окружающую среду для объектов, к которым относятся искусственные водоемы с площадью водной поверхности более 50 га, плотины высотой 2 м и более [4, 5].

Прогнозирование развития и масштабов возможных гидродинамических аварий на водоподпорных гидротехнических сооружениях (ГТС) включает в себя прогнозирование степени разрушения ГТС, параметров волны прорыва, поставарийного состояния русла и поймы в возможной зоне затопления и последствий аварий для населения и территорий в зоне возможного затопления [6]. Расчеты по определению параметров волны прорыва и оценке возможных последствий затопления необходимы при составлении оперативно-тактических планов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций при авариях на подпорных сооружениях, установлении вероятного ущерба от затопления территории в нижнем бьефе гидротехнического сооружения в результате прохождения волны прорыва [7–9]. Во всех перечисленных случаях нужно оценить зону затопления и гидродинамические параметры потока: максимальные значения глубины и скорости потока в зоне катастрофического затопления, время от начала аварии до прихода в данную точку местности прорывной волны, продолжительность затопления, границы зоны катастрофического затопления, гидрограф расхода в створе размываемой плотины и график падения уровня верхнего бьефа.

Степень достоверности прогнозных расчетов определяется точностью двух применяемых математических моделей: 1) размыва плотины; 2) движения волны прорыва. Анализ показывает, что для расчета движения волны прорыва во всех случаях используются гидродинамические модели, основанные на одно- и двумерных уравнениях Буссинеска – Сен-Венана [7–9]. В рамках поставленных задач они дают правдоподобные результаты, поэтому более точное решение с помощью 3D гидродинамических моделей, основанных на полной системе уравнений Навье – Стокса, здесь не требуется [10–11]. Параметры волны – высота и скорость распространения – полностью зависят от гидрографа расхода в створе размываемой плотины, который, в свою очередь, определяется динамикой размыва плотины. В то же время анализ используемых математических моделей для расчета

динамики размыва плотины, особенно ее первой стадии до расширения прорана, показал, что они недостаточно совершенны и базируются на приближенных зависимостях [7–9].

Цель исследований – разработка методики моделирования процесса затопления нижнего бьефа.

Моделирование течения в нижнем бьефе

Решение поставленной задачи заключается в моделировании потока в нижнем бьефе с помощью уравнений Сен-Венана. Для этого необходимо знать граничные (на границе прорана и нижнего бьефа) и начальные условия для скорости и глубины потока. Граничные условия можно получить только в результате решения задачи о разрушении грунтовой плотины [12].

Система уравнений Сен-Венана для течения воды в открытом русле произвольного профиля имеет вид [13–15]:

$$\begin{cases} \alpha \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{W} \right) \right] + gW \left(\frac{\partial h}{\partial x} + i_f - i_p \right) = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где α – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока; t – время, с; x – протяженность по водотоку, м; $Q(x, t)$ – расход воды, м³/с; $W(x, t)$ – площадь живого сечения потока, находящегося на расстоянии x от начала потока в момент времени t , м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h(x, t)$ – глубина, м; $i_f(x, t)$ – уклон трения потока; i_p – уклон дна реки в нижнем бьефе.

В [13] отмечается, что имеется достаточно удовлетворительная связь α с коэффициентом шероховатости по Маннингу: $\alpha = 14,8n + 0,884$, причем если в результате расчета по этой формуле $\alpha > 2$, рекомендуется принимать $\alpha = 2$.

Скорость потока находим по формуле

$$v(x, t) = \frac{Q(x, t)}{W(x, t)}. \quad (2)$$

Уклон трения потока i_f определим из формулы Шези

$$i_f = \frac{Q^2}{W^2 C^2 R} = \frac{v^2 n^2}{R^{4/3}}, \quad (3)$$

где C – скоростной коэффициент Шези, вычисленный по формуле Маннинга $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, м^{0,5}/с; $R = \frac{W(x, h)}{P(x, h)}$ – гидравлический радиус живого сече-

ния потока, находящегося на расстоянии x от начала потока и имеющего глубину h , м; $P(x, h)$ – смоченный периметр сечения, м; n – коэффициент шероховатости дна русла [16], $\text{с/м}^{1/3}$.

С учетом (2) и (3) система (1) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial(vW)}{\partial x} = 0; \\ \alpha \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \left(\frac{v^2 n^2}{R^{4/3}} - i_p \right) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Дальнейшие исследования будем проводить с учетом системы (4).

Способ описания поверхности в нижнем бьефе. Чтобы система (4) была замкнутой, необходимо знать зависимости площади живого сечения $W(x, h)$ и смоченного периметра $P(x, h)$ от глубины h и расстояния x от прорана. Это предполагает знание геометрии поверхности в нижнем бьефе. Ниже приведена методика описания этой поверхности, которую несложно применить на практике и которая позволяет достаточно легко получить нужные зависимости для W и P . Следуя [17], сделаем определенные предположения о поверхности в нижнем бьефе.

1. Можно выделить некое прямоугольное русло предполагаемого потока, т. е. указать средние значения его ширины B_p , высоты берега h_6 , уклона дна i_p , шероховатости n (в [17], в отличие от нашего случая, речь идет о пойме конкретной реки и все эти параметры известны). Русло должно начинаться в районе предполагаемого прорана. Выбрать его можно как окрестность линии, состоящей из точек с самыми маленькими геодезическими отметками.

2. Поверхность долины вне русла является кусочно-линейной. Это означает, что на каждой стороне долины (левой и правой) относительно выбранного русла можно выделить n линий уровня $L_0^{n(n)}, \dots, L_n^{n(n)}$ (где нижний индекс – номер линии уровня, верхний – левая или правая сторона), образованных точками с равными отметками высот $h_6 = h_0 < h_1 < \dots < h_n$ относительно дна предполагаемого русла (каждая линия $L_k^{n(n)}$ соответствует высоте h_k , а $L_0^{n(n)}$ – линии берега); на каждом из участков между соседними линиями $L_k^{n(n)}$ и $L_{k+1}^{n(n)}$ берег является кусочно-линейной поверхностью, направляющими линиями которой служат ограничивающие этот участок линии уровня, а образующими – прямые, соединяющие точки линий уровня, которые лежат в плоскости $s = s_0$, где s – расстояние вдоль русла потока до плотины (плоскость перпендикулярна руслу и находится на расстоянии s_0 от плотины). Высказанное предположение поясняет рис. 1.

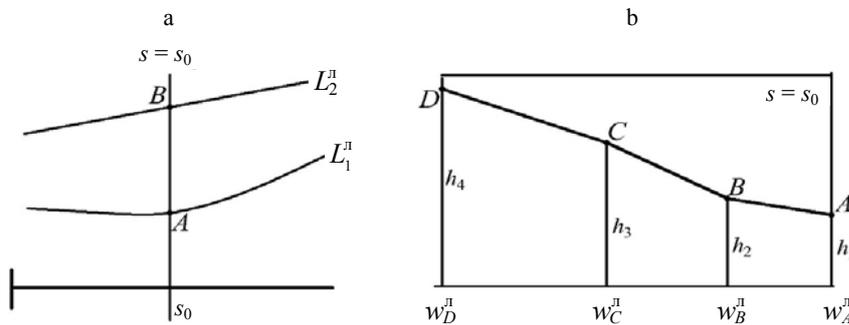


Рис. 1. Схема участка (левого) долины: а – план; б – поперечный разрез
Fig. 1. Diagram of the (left) valley section: a – schedule; b – cross section

На рис. 1а представлен план участка, где плоскость $s = s_0$ пересекает линии уровней L_1^n и L_2^n , соответствующие высотам h_1 и h_2 , в точках A и B . Следовательно, отрезок AB считается образующей береговой поверхности на этом участке (между линиями уровней L_1^n и L_2^n). На рис. 1б показано сечение береговой поверхности плоскостью $s = s_0$, где $h_1 < h_2 < h_3 < h_4$ – высоты относительно дна русла точек A , B , C и D соответственно, $w_A^n < w_B^n < w_C^n < w_D^n$ – расстояния от этих точек до берега русла. Такое предположение не противоречит обычному устройству речных долин в республике, хотя и вносит определенные погрешности в вычисления. При этом погрешность будет уменьшаться с увеличением числа линий уровня и более точным заданием этих линий.

Задавать линии уровня можно таблично [17]. Каждая строка таблицы содержит числа $s_k, w_{k,1}^{n(n)} < w_{k,2}^{n(n)} < \dots < w_{k,m}^{n(n)}$ (где s_k – расстояние по руслу от плотины; $w_{k,m}^{n(n)}$ – расстояние от берега русла до точки пересечения m -й линии уровня, соответствующей глубине h_m , с плоскостью $s = s_k$ (рис. 1б)). Значение $w_{k,0}^{n(n)} = 0$ для любого k . Сказанное иллюстрирует рис. 2, где приведены пять линий уровня для обоих берегов ниже створа плотины водохранилища Клястицы на р. Ница (Россонский район Витебской области).

Рассмотрим процедуру определения площади живого сечения $W(x, h)$, а также смоченного периметра $P(x, h)$ на расстоянии x от плотины при глубине потока h при сделанных предположениях о структуре береговой поверхности (считаем, что линии уровня заданы таблично). Приведем только конечные результаты, опуская несложные промежуточные выкладки.

Итак, заданы расстояние x по руслу от плотины и глубина потока h .

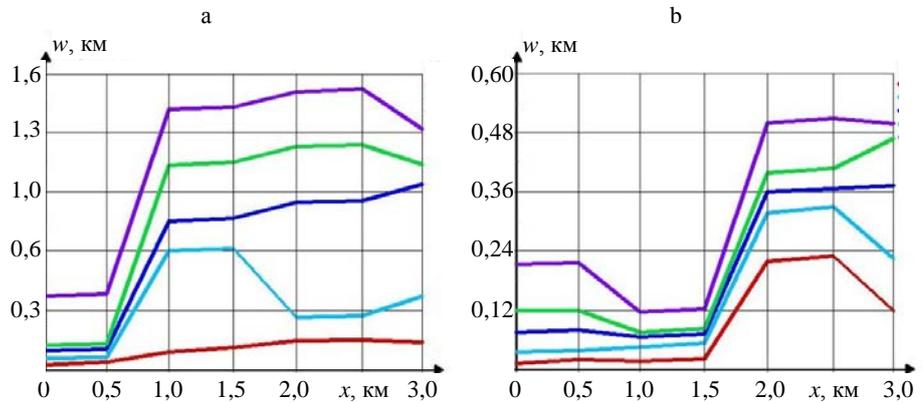


Рис. 2. Линии уровня, заданные таблично через 500 м, для береговой поверхности за плотиной водохранилища Клястицы на реке Ница: а – левый берег; б – правый берег; — $h = 2,5$ м; — $h = 5,0$ м; — $h = 7,5$ м; — $h = 10,0$ м; — $h = 15,0$ м

Fig. 2. Level lines, set in a table at intervals of 500 m, for the coastal surface behind the dam of the Klyastitsy reservoir on the Nisha river: а – left bank; б – right bank; — $h = 2.5$ m; — $h = 5.0$ m; — $h = 7.5$ m; — $h = 10.0$ m; — $h = 15.0$ m

Находим целый параметр k из условия: отрезок $[s_k; s_{k+1}]$ содержит точку x . Определяем расстояния $xw_{k,1}^{n(n)} < xw_{k,2}^{n(n)} < \dots < xw_{k,n}^{n(n)}$ до русла для точек пересечения линий уровня с плоскостью $s = x$

$$xw_{k,m}^{n(n)} = w_{k,m}^{n(n)} + \frac{w_{k+1,m}^{n(n)} - w_{k,m}^{n(n)}}{s_{k+1} - s_k} (x - s_k), \quad m = 1, \dots, n.$$

Значения $xw_{k,0}^{n(n)} = 0$ для любого k (это значит, что точки $(x; xw_{k,0}^{n(n)})$ лежат на берегу русла).

Далее находим целый параметр m из условия: отрезок $[h_m; h_{m+1}]$ содержит точку h . Определяем расстояние $w_h^{n(n)}$ до берега выбранного русла от точки, находящейся на берегу на расстоянии x от плотины, на высоте h от дна русла. Если $h \leq h_0$, то $w_h^{n(n)} = 0$. Пусть $h > h_0$. Тогда

$$w_h^{n(n)} = xw_{k,m}^{n(n)} + w_0 = xw_{k,m}^{n(n)} + \frac{h - h_m}{h_{m+1} - h_m} (xw_{k,m+1}^{n(n)} - xw_{k,m}^{n(n)}).$$

Теперь находим площадь живого сечения $W(x, h)$ и смоченный периметр $P(x, h)$. Если $h \leq h_0$, то $W(x, h) = B_p h$ и $P(x, h) = B_p + 2h$.

Пусть $h > h_0$. Тогда:

$$W(x, h) = \left(w_h^n + B_p + w_h^n \right) h - \sum_{i=1}^m \frac{h_i - h_{i-1}}{2} \left(xw_{k,i}^n - xw_{k,i-1}^n + xw_{k,i}^n - xw_{k,i-1}^n \right) - \frac{h - h_m}{2} \left(w_h^n - xw_{k,m}^n + w_h^n - xw_{k,m}^n \right); \quad (5)$$

$$P(x, h) = B_p + 2h_6 + \sum_{i=1}^m \sqrt{\Delta h_i^2 + (xw_{k,i}^n - xw_{k,i-1}^n)^2} + \sqrt{\Delta h_m^2 + (w_h^n - xw_{k,m}^n)^2} + \sum_{i=1}^m \sqrt{\Delta h_i^2 + (xw_{k,i}^n - xw_{k,i-1}^n)^2} + \sqrt{\Delta h_m^2 + (w_h^n - xw_{k,m}^n)^2}. \quad (6)$$

Все приведенные выше вычисления проиллюстрированы на рис. 3.

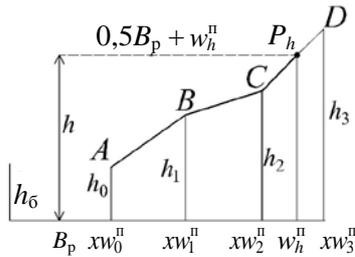


Рис. 3. Сечение правого берега плоскостью $s = x$

Fig. 3. Section of the right bank by schedule $s = x$

При использовании данной методики следует выбирать максимальную высоту h_n для последней линии уровня так, чтобы она была больше предполагаемой максимальной глубины затопления.

Граничные и начальные условия для системы (4). Решение задачи моделирования разрушения плотины на каждом из этапов позволяет определить расход $Q(t)$ на границе нижнего бьефа, что, в свою очередь, дает возможность найти функции скорости $v_0(t)$ и глубины $h_0(t)$ потока, возникающего на границе $x = 0$ в нижнем бьефе. Для этого используем формулы Шези, (2), (5) и (6) и решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} Q(t) = v_0(t)W(0, h_0(t)); \\ Q(t) = W(0, h_0(t))C\sqrt{Ri_p}, \end{cases} \quad (7)$$

где R – гидравлический радиус начального сечения, м; i_p – уклон дна реки в нижнем бьефе; C – коэффициент Шези, $m^{0.5}/c$.

Таким образом, задаем условия для системы (4) на границе $x = 0$:

$$\begin{cases} v(0, t) = v_0(t); \\ h(0, t) = h_0(t). \end{cases} \quad (8)$$

Как показали вычисления, проведенные по методике, описанной в [12], для грунтовой плотины водохранилища Клястицы на первом этапе моделирования разрушения плотины (размыв гребня плотины) поступающий расход в нижний бьеф, как правило, вначале мал (менее $2 \text{ м}^3/\text{с}$) и медленно меняется, а время этапа достаточно продолжительное. Поэтому предполагаем, что на данном этапе происходит равномерное движение потока по выбранному руслу в нижнем бьефе. Тогда в качестве начальных условий полагаем:

$$\begin{cases} v(x, t_0) \equiv v_n; \\ h(x, t_0) \equiv h_n, \end{cases} \quad (9)$$

где t_0 – наименьший момент времени на первом этапе, для которого $Q(t_0) > 1$; h_n, v_n – определяются из системы (7) по расходу $Q(t_0)$.

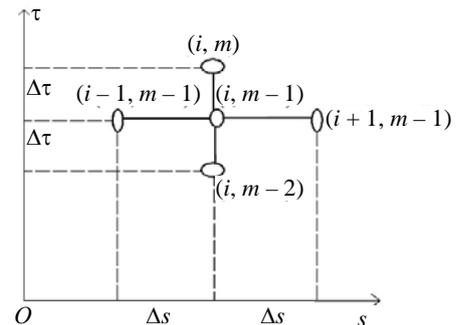
Приближенное решение системы (4). Уравнения (4) являются нелинейными с переменными коэффициентами, так что отыскание их интегралов представляет большие математические трудности [18]. Решение (4), (8), (9) ищем численными методами, а именно методом сеток, используя рекомендации, изложенные в [13, 18, 19].

Поскольку (5), (8), (9) требуется решать для достаточно больших отрезков как по переменной t (несколько суток), так и по переменной x (несколько километров), для более эффективного применения численных методов в системе (1) имеет смысл сделать замену времени и пространственной переменной [19]: $\tau = \frac{t}{M}, s = \frac{x}{Z}, h_1(s, \tau) = h(x, t), v_1(s, \tau) = v(x, t), W_1(s, \tau) = W(x, t)$, где M, Z – достаточно большие числа (например, $Z = 10 \cdot 1000$ – количество метров в 10 км; $M = 120 \cdot 3600$ – количество секунд в пяти сутках).

В качестве разностной схемы, аппроксимирующей дифференциальные уравнения (4), используем явную разностную схему. Во многих источниках (например, в [13]) указывается, что для уравнений Сен-Венана более рационально использовать неявную схему, но для ее применения требуется знание граничных условий, кроме участка границы $x = 0$, как минимум еще и на конечном участке $x = x_{\max}$ изучаемого течения, что для рассматриваемой задачи, очевидно, невозможно.

Разностная схема строится с использованием шаблона, приведенного на рис. 4.

Рис. 4. Шаблон для разностной схемы:
($i\Delta s, m\Delta\tau$) – координаты узлов сетки,
где $i = 0, 1, 2, \dots; m = 0, 1, 2, \dots; \Delta s$ – шаг сетки
по оси Os ; $\Delta\tau$ – шаг сетки по оси $O\tau$
Fig. 4. Template for the difference scheme:
($i\Delta s, m\Delta\tau$) – coordinates of grid nodes,
here $i = 0, 1, 2, \dots; m = 0, 1, 2, \dots; \Delta s$ – grid step
along the axis Os ; $\Delta\tau$ – grid step along the axis $O\tau$



Для произвольной функции $f(s, \tau)$ обозначим $f_i^m = f(i\Delta s, m\Delta\tau)$ – ее значения в узлах сетки и аппроксимируем производные в узлах ($i\Delta s, m\Delta\tau$) соотношениями:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \tau} \right|_{(i\Delta s, m\Delta \tau)} \rightarrow \frac{(1+d)f_i^m - (1+2d)f_i^{m-1} + df_i^{m-2}}{\Delta \tau}, \quad m > 1; \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial s} \right|_{(i\Delta s, m\Delta \tau)} \rightarrow \frac{f_{i+1}^{m-1} - f_{i-1}^{m-1}}{2\Delta s}, \quad i \geq 1,$$

где $d \in [0; 1]$ – некоторый задаваемый параметр (имеет смысл брать $d = 0,5$, поскольку в этом случае приближение для $\frac{\partial f}{\partial \tau}$ имеет второй порядок точности по $\Delta \tau$; в итоге оба используемых приближения будут иметь второй порядок точности по соответствующим приращениям переменных). В [13] рекомендуется использовать второе из соотношений (10).

При решении систем разностных уравнений следует использовать тот факт, что функция $W = W(x, h)$ при любом x монотонно возрастает по h , потому уравнение однозначно разрешимо относительно h , т. е. по значению W всегда можно однозначно определить величину $h = W^{-1}(x, W)$ и по этому значению, используя (6), найти гидравлический радиус $R = R(x, W)$.

Пример расчета. С использованием методики, описанной в [12], приведем результаты моделирования затопления территории нижнего бьефа при образовании волны прорыва вследствие разрушения однородной земляной плотины на водохранилище Клястицы на р. Нища.

Исходные данные:

- для плотины: отметка гребня плотины $Y_{гр} = 5,5$ относительно отметки гребня водосброса; ширина гребня плотины $b_{гр} = 6$ м; диаметр частиц грунта тела плотины $d = 0,5$ мм; среднее заложение откосов плотины $\bar{m}' = 2,75$; плотность грунта тела плотины $\rho = 1600$ кг/м³; гидравлическая крупность $w = 0,05$ м/с; постоянная, зависящая от гранулометрического состава размываемого грунта, $\beta = 2$; коэффициент расхода для первого этапа $m_1 = 0,35$; коэффициент расхода 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 $B_{пр} = 10$ м;

- для русла за плотинной (средние значения): ширина русла $B_p = 15$ м; высота берега $h_6 = 1,2$ м; коэффициент шероховатости русла $n = 0,03$; средний уклон русла $i_p = 0,0004$. Линии уровня береговой поверхности заданы таблично и проиллюстрированы на рис. 2;

- вычисленные показатели: коэффициент шероховатости поверхности низового откоса, найденный по формуле Гончарова, $n_1 = 0,0125$; коэффициент α [13] в системе (4): $\alpha = 14,8n + 0,884 = 1,328$.

Результаты расчета параметров волны в нижнем бьефе представлены в виде кривых изменения во времени высоты волны $h = h(t)$ относительно дна выбранного русла, скорости волны $v = v(t)$, ширины затопления поймы

левого $w^л = f_л(t)$ и правого $w^п = f_п(t)$ берегов в разных створах русла (рис. 5), находящихся на расстоянии s от плотины.

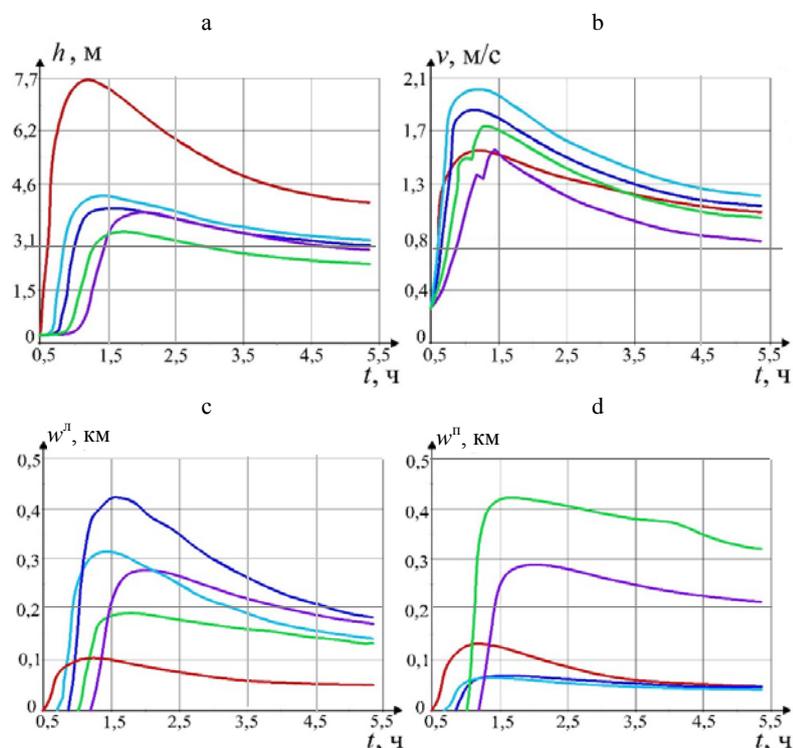


Рис. 5. Результаты моделирования течения в нижнем бьефе: а – высота волны; б – скорость волны; с, d – ширина затопления левой и правой пойм; — $s = 0$; — $0,8$ км; — $1,4$ км; — $2,2$ км; — $s = 3,0$ км

Fig. 5. Downstream flow simulation results: а – wave height, m; б – wave speed, m/s; с, d – flood width of the left and right floodplains; — $s = 0$; — 0.8 km; — 1.4 km; — 2.2 km; — $s = 3.0$ km

Обработав полученные результаты и нанеся их на спутниковые карты (в пиковый момент времени $t = 1,5$ ч), можно оценить границы затопления, а также отследить объекты, попадающие в эту зону. Расчетные границы зоны затопления нижнего бьефа Клястицкого гидроузла показаны на рис. 6.



Рис. 6. Расчетные границы зоны затопления территории нижнего бьефа водохранилища Клястицы при разрушении плотины

Fig. 6. Estimated zones of flooding of the territory of the lower pool of the Klyastitsy reservoir during the destruction of the dam

Анализ рис. 6 показал, что в зону затопления попали северная окраина аг. Клястицы и д. Заборье, а также участок шоссе между ними.

ВЫВОДЫ

1. Создана методика расчета зоны затопления территории ниже земляной плотины водохранилища при ее размыве, позволяющая рассчитать скорость и глубину волны прорыва, оценить границы зоны затопления территории нижнего бьефа, глубину и время стояния паводковых вод, а также уровни воды в верхнем бьефе гидроузла во времени и скорость развития прорана. Исходными данными являлись параметры плотины, гидрологические данные, линии уровня речной долины реки.

2. Методика расчета основана на предварительном решении численным методом системы уравнений, описывающих размыв грунтовой плотины [12], что позволяет получить гидрограф расхода в створе размываемой плотины, а также граничные и начальные условия для скорости и глубины потока в этом створе. Решение системы уравнений Сен-Венана дает возможность определить параметры волны прорыва в нижнем бьефе гидроузла. Разработана компьютерная программа. Приведен пример расчета.

3. Предлагаемую методику можно применять для оценки ущерба от затопления территорий, а также при составлении оперативно-тактических планов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций при авариях на подпорных сооружениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обухов, Е. В. Исследование влияния водности года на внешний водообмен Днепро-дзержинского водохранилища в условиях изменения климата / Е. В. Обухов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 380–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-380-388>.
2. Левкевич, В. Е. Закономерности развития береговых процессов на водохранилищах гидроэлектростанций Беларуси / В. Е. Левкевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 463–478. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-463-478>.
3. Правила определения количественных и качественных характеристик водного режима при создании плотин и водохранилищ на реках: ТКП 17.06-06–2012 (02120). Минск: Минприроды, 2012. 40 с.
4. О государственной экологической экспертизе, стратегической экологической оценке и оценке воздействия на окружающую среду: Закон Респ. Беларусь от 18 июля 2016 г. № 399-З // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь, 21.07.2016, 2/2397.
5. Пособие по проведению оценки воздействия на окружающую среду водохранилищных ГЭС / Концерн «Белэнерго». Минск, 2005. 68 с.
6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) и прогнозирование возможных последствий гидродинамических аварий на них. Общие требования: ГОСТ Р 22.1.11–2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 15 с.
7. Карпенчук, И. В. Определение параметров волны прорыва и оценка возможных последствий затопления / И. В. Карпенчук, М. Ю. Стриганова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Респ. Беларусь. 2008. № 2. С. 41–45.

8. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения: РД 153-34.2-002-01. М.: М-во энергетики Рос. Федерации, 2001. 59 с.
 9. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судходных гидротехнических сооружений: приказ МЧС и Минтранса Рос. Федерации от 2 октября 2007 г. № 528/143.
 10. Компьютерное моделирование прохождения прорывных и паводковых волн по речной пойме: гидравлические параметры, безопасность, оперативное управление / А. Л. Бубер [и др.] // Актуальные проблемы гражданской защиты: XI Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: тезисы докладов. М., 2006. С. 57.
 11. Волюнов, М. А. Результаты трехмерного моделирования волны прорыва вблизи прорана / М. А. Волюнов, И. В. Гугушвили // Природообустройство. 2011. № 2. С. 38–42.
 12. 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>.
 13. Грушевский, М. С. Волны попусков и паводков в реках / М. С. Грушевский. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 336 с.
 14. Klohn-Crippen. Red River One-Dimensional Unsteady Flow Model: Final Report Submitted to International Joint Commission. Richmond (British Columbia), 1999. 88 p.
 15. Ahmad, S. Comparison of One-Dimensional and Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling Approaches for Red River Basin: Final Report to International Joint Commission / S. Ahmad, S. P. Simonovic. Winnipeg: University of Manitoba, 1999. 52 p.
 16. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. М.: Недра, 1970. 216 с.
 17. Приближенная методика расчета затопления поймы реки при экстремальных попусках из водохранилища в период половодья / В. В. Вереме́нюк [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2018. Т. 2, № 1. С. 67–74.
 18. Вереме́нюк, В. В. Расчет параметров волны половодья в реке ниже водохранилища / В. В. Вереме́нюк, В. В. Ива́шечкин // Мелиорация. 2016. № 1. С. 26–31.
 19. Турчак, Л. И. Основы численных методов / Л. И. Турчак. М.: Наука, 1987. 320 с.
- Поступила 07.04.2020 Подписана в печать 18.06.2021 Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Obukhov E. V. (2017) A Study of the Influence of the Yearlong Water Content on the External Water Exchange in Dneprodzerzhinsk Reservoir under Conditions of Climate Change. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 380–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-380-388> (in Russian).
2. 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).
3. TCP 17.06-06–2012 (02120). *Rules for Determining the Quantitative and Qualitative Characteristics of the Water Regime when Creating Dams and Reservoirs on Rivers*. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2012. 40 (in Russian).
4. Law of the Republic of Belarus of July 18, 2016 No 399-3 “On State Environmental Expertise, Strategic Environmental Assessment and Environmental Impact Assessment”. *National Legal Portal of the Republic of Belarus*, 21.07.2016, 2/2397 (in Russian).
5. Belenergo Concern (2005) *A Guide for Assessing the Environmental Impact of Reservoir Hydropower Plants*. Minsk. 68 (in Russian).

6. State Standard R 22.1.11–2002. *Safety in Emergencies. Monitoring the State of Water-Retaining Hydraulic Structures (Dams) and Predicting the Possible Consequences of Hydrodynamic Accidents on Them. General Requirements*. Moscow, Izdatel'stvo Standartov Publ. 2002. 15 (in Russian).
7. Karpenchuk I. V., Striganova M. Yu. (2008) Determining the Parameters of the Breakout Wave and Assessment of the Possible Consequences of Flooding. *Vestnik Komandno-Inzhenerenogo Instituta MChS Respubliki Belarus'* [Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus], (2), 41–45 (in Russian).
8. Guidance Document 153-34.2-002-01. *Temporary Methodology for Assessing the Damage that is Possible as a Result of a Breakdown of a Hydraulic Structure*. Moscow, Ministry of Energy of the Russian Federation, 2001. 59 (in Russian).
9. Methodology for Determining the Amount of Harm 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 Structures. Order of the Ministry of Emergency Situations and Ministry of Transport of the Russian Federation of October 2, 2007, No 528/143. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=237379> (in Russian).
10. Buber A. L., Volynov M. A., Gugushvili I. V., Troshina M. V. (2006) Computer Simulation of the Passing of Breakthrough and Flood Waves along the River Floodplain: Hydraulic Parameters, Safety, Operational Control. *Aktual'nye Problemy Grazhdanskoi Zashchity: XI Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. po Problemam Zashchity Naseleniya i Territorii ot Chrezvychainykh Situatsii: Tezisy Dokladov* [Actual Problems of Civil Protection: XI International Scientific and Practical Conference on the Problems of Protecting Population and Territories from Emergency Situations. Abstracts of Papers]. Moscow, 57 (in Russian).
11. Volynov M. A., Gugushvili I. V. (2011) Results of 3D Modeling of the Breakout Wave near the Breach. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], (2), 38–42 (in Russian).
12. Bohaslauchyk P. M. (2018) Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 17 (4), 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296> (in Russian).
13. Grushevskii M. S. (1989) *Waves of Releases and Floods in Rivers*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 336 (in Russian).
14. Klohn-Crippen Consultants Ltd (1999) *Red River One-Dimensional Unsteady Flow Model: Final Report Submitted to International Joint Commission*. Richmond (British Columbia). 88.
15. Ahmad S., Simonovic S. P. (1999) *Comparison of One-Dimensional and Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling Approaches for Red River Basin, Final Report to International Joint Commission*. Winnipeg, University of Manitoba. 52.
16. Al'tshul' A. D. (1970) *Hydraulic Resistance*. Moscow, Nedra Publ. 216 (in Russian).
17. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Semenova Ya. A., Nemeravets O. V. (2018) Approximate Method of Calculation of Inundation of River Valley at Extreme Releases from Water Reservoir in the Period of the High Water. *Vestnik Universiteta Grazhdanskoi Zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, 2 (1), 67–74 (in Russian).
18. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V. (2016) Calculation of the Flood Wave in the River Below the Reservoir. *Melioratsiya = Land Reclamation*, (1), 26–31 (in Russian).
19. Turchak L. I. (1987) *Fundamentals of Numerical Methods*. Moscow, Nedra Publ. 320 (in Russian).

**ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИКА»
в 2021 г.**

I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Мирончук В. И., Вельченко А. А. Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счет локализации солнечной энергии . . .	1
Михалевич А. А., Рак В. А. Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС	1

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Бладыко Ю. В., Пономаренко Е. Г. Механический расчет гибких токопроводов с учетом отпаек к электрическим аппаратам	2
Доброго К. В., Бладыко Ю. В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров	1
Доброго К. В., Бладыко Ю. В. Моделирование сборок аккумуляторных батарей в электронной лаборатории	5
Жежеленко И. В., Кривонос В. Е., Василенко С. В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя	3
Капустинский А. Ю., Константинова С. В. Повышение чувствительности защит в электрических сетях до 1 кВ путем применения микропроцессорных и полупроводниковых расцепителей	5
Капустинский А. Ю., Константинова С. В. Способы токоограничения в электрических сетях до 1 кВ	6
Константинова С. В., Капустинский А. Ю., Ярошевич Т. М. Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме	1
Kuchanskyi V. V. Comparative Analysis of Measures and Technical Means for Suppressing the Aperiodic Current Component in Circuit Breaker (Кучанский В. В. Сравнительный анализ мероприятий и технических средств для подавления апериодической составляющей в токе линейного выключателя)	4
Ласый П. Г., Мелешко И. Н. Приближенное решение смешанной задачи для телеграфного уравнения с однородными краевыми условиями первого рода с помощью специальных функций	2
Левицкий А. С., Зайцев Е. А., Панчик М. В. Метод контроля сердечника статора мощного турбогенератора	4
Маляр В. С., Маляр А. В. Математическая модель и характеристики асинхронного двигателя при питании от источника тока	5
Менжинский А. Б., Малашин А. Н., Менжинский П. Б. Разработка уточненных электромагнитных моделей электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами	4
Олексюк И. В. Старение изоляции из сшитого полиэтилена кабельных линий . . .	2

Pokorny J., Marcon P., Kriz T., Janousek J. A Detection System with Spider Web Coil-Based Wireless Charging and an Active Battery Management System (Покорный Й., Маркон П., Криз Т., Яноусек Й. Система обнаружения с беспроводной зарядкой на основе катушки с крестовидной перемычкой и активной системой управления аккумулятором)	3
Потащиц Я. В. Исследование возникновения резонанса при воздействии динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок	3
Прахт В. А., Гоман В. В., Парамонов А. С. Оптимизация параметров вторичного элемента односторонних линейных асинхронных электродвигателей с использованием генетического алгоритма	6
Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю., Новаш И. В. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах	2
Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю., Новаш И. В. Формирование ортогональных составляющих входных токов в микропроцессорных защитах электроустановок	3
Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А. Разработка в MATLAB-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока. Часть 1	6
Sidorkin D. I., Kupavykh K. S. Justification on Choosing Screw Pumping Units as Energy Efficient Artificial Lift Technology (Сидоркин Д. И., Купавых К. С. Обоснование выбора винтовых насосных установок как энергоэффективной технологии механизированной добычи)	2
Счастный В. П., Жуковский А. И. Взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий	3
Фархадзаде Э. М., Мурадалиев А. З., Абдуллаева С. А., Назаров А. А. Автоматизированный анализ срока службы воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем	5
Хвалин Д. И., Кенсицкий О. Г., Кобзарь К. А. Моделирование электромагнитного поля мощной электрической машины	2
Шпенст В. А., Орел Е. А. Повышение надежности вторичного источника питания постоянного тока резервированием сигналов обратной связи	5

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Волк А. М., Вилькоцкий А. И., Пыжкова О. Н. Оценка эффективности процессов переноса в роторном аппарате	5
Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. Simulation of Photovoltaic Thermoelectric Battery Characteristics (Есман А. К., Зыков Г. Л., Потащиц В. А., Кулешов В. К. Моделирование характеристик фототермоэлектрической батареи)	3
Гриценко А. В., Внукова Н. В., Позднякова Е. И. Совместное сжигание продуктов пиролиза шин и древесных пеллет	4
Митрофанов А. В., Мизонов В. Е., Василевич С. В., Малько М. В. Экспериментальное и расчетное исследования пиролиза биомассы в цилиндрическом реакторе	1
Митрофанов А. В., Мизонов В. Е., Шпейнова Н. С., Василевич С. В., Касаткина Н. К. Опытное-теоретическое исследование аксиального распределения частиц твердой фазы в кипящем слое	4
Овсянник А. В., Ключинский В. П. Термодинамический анализ и оптимизация параметров вторичного перегрева в турбодетандерных установках на низкокипящих рабочих телах	2

Овсянник А. В., Ключинский В. П. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах	1
Opiatiuk V. V., Kozlov I. L., Skalozubov V. I., Ostapenko I. A. Study of Parametric Interactions in the Nuclear Reactor Control with Feedback (Опятюк В. В., Козлов И. Л., Скалозубов В. И., Остапенко И. А. Исследование параметрических взаимодействий при регулировании ядерного реактора с обратной связью)	6
Петраш В. Д., Макаров В. О., Хоменко А. А. Эффективность парокompрессионной трансформации энергетических потоков для теплоснабжения на основе морской воды	6
Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu Minh Phap, Romaniuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen Thuy Nga. Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water (Пехота А. Н., Хрусталеv Б. М., Ву Минь Фап, Романюк В. Н., Пехота Е. А., Вострова Р. Н., Нгуен Тху Нга. Технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием отходов сточных вод)	6
Романюк В. Н., Нияковский А. М. Научно-методические основы эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках. Часть 2	4
Романюк В. Н., Нияковский А. М. Научно-методические основы эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках. Часть 1	3
Сорокин В. В. Анализ производительности пассивного каталитического реакombинатора водорода с учетом условий внутри герметичного ограждения локализуемой системы безопасности АЭС с ВВЭР	2
Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С. Конвективная теплоотдача однорядных пучков из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты при малых числах Рейнольдса	4
Фиков А. С. Метод расчета переходных процессов в газопроводе	5
Хрусталеv В. А., Гариевский М. В. Эффективность использования пускорезервной котельной для получения пиковой выработки паровой турбиной АЭС ...	1

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Веременюк В. В., Ивашечкин В. В., Немеровец О. В. Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины	6
Ивашечкин В. В., Крицкая В. И., Ануфриев В. Н., Аврутин О. А. Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования	3

II. ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ**А**

Аврутин О. А., 3
Ануфриев В. Н., 3
Абдуллаева С. А., 5

Б

Бладько Ю. В., 1, 2, 5

В

Василевич С. В., 1, 4
Василенко С. В., 3
Вельченко А. А., 1
Веремениук В. В., 6
Вилькоцкий А. И., 5
Внукова Н. В., 4
Волк А. М., 5
Вострова Р. Н., 6
Ву Минь Фап, 6

Г

Гариевский М. В., 1
Гоман В. В., 6
Гриценко А. В., 4

Д

Данильчик Е. С., 4
Доброго К. В., 1, 5

Е

Есман А. К., 3

Ж

Жежеленко И. В., 3
Жуковский А. И., 3

З

Зайцев Е. А., 4
Зыков Г. Л., 3

И

Ивашечкин В. В., 3, 6

К

Капустинский А. Ю., 1, 5, 6
Касаткина Н. К., 4
Кенсицкий О. Г., 2
Ключинский В. П., 1, 2
Кобзарь К. А., 2
Козлов И. Л., 6
Константинова С. В., 1, 5, 6
Кривоносов В. Е., 3
Криз Т., 3
Крицкая В. И., 3
Кулешов В. К., 3
Купавых К. С., 2
Кучанский В. В., 4

Л

Ласый П. Г., 2
Левицкий А. С., 4

М

Макаров В. О., 6
Малашин А. Н., 4
Малько М. В., 1
Маляр А. В., 5
Маляр В. С., 5
Маркон П., 3
Мелешко И. Н., 2
Менжинский А. Б., 4
Менжинский П. Б., 4
Мизонов В. Е., 1, 4
Мирончук В. И., 1
Митрофанов А. В., 1, 4
Михалевич А. А., 1
Мурадалиев А. З., 5

Н

Назаров А. А., 5
Нгуен Тху Нга, 6
Немеровец О. В., 6
Нияковский А. М., 3, 4
Новаш И. В., 2, 3

О

Овсянник А. В., 1, 2
Олексюк И. В., 2

Опятюк В. В., 6
Орел Е. А., 5
Остапенко И. А., 6

II

Панчик М. В., 4
Парамонов А. С., 6
Петраш В. Д., 6
Пехота А. Н., 6
Пехота Е. А., 6
Позднякова Е. И., 4
Покорный Й., 3
Пономаренко Е. Г., 2
Потачиц В. А., 3
Потачиц Я. В., 3
Прахт В. А., 6
Пыжкова О. Н., 5

P

Рак В. А., 1
Романюк В. Н., 3, 4, 6
Романюк Ф. А., 2, 3, 6
Румянцев В. Ю., 2, 3
Румянцев Ю. В., 2, 3, 6

C

Сидоркин Д. И., 2
Скалозубов В. И., 6
Сорокин В. В., 2
Сухоцкий А. Б., 4
Счастный В. П., 3

Ф

Фархадзаде Э. М., 5
Фиков А. С., 5

X

Хвалин Д. И., 2
Хоменко А. А., 6
Хрусталеv Б. Н., 6
Хрусталеv В. А., 1

Ш

Шпейнова Н. С., 4
Шпенст В. А., 5

Я

Яноусек Й., 3
Ярошевич Т. М., 1