

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

**ЭНЕРГЕТИКА**

Том 65, № 1  
2022

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

**Учредитель**

Министерство образования Республики Беларусь

---

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

<b>Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А.</b> Разработка в MATLAB-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока. Часть 2 .....	5
<b>Доброго К. В.</b> Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при трогании и на холостом ходу . . .	22
<b>Счастный В. П., Жуковский А. И.</b> Электромагнитная совместимость компенсирующих устройств и преобразователей регулируемого электропривода в электрических сетях промышленных предприятий .....	37

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

<b>Романюк В. Н., Нияковский А. М., Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Рыжова Т. Н.</b> Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках .....	52
<b>Сорокин В. В.</b> Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР .....	67
<b>Овсянник А. В., Ключинский В. П.</b> Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина .....	76
<b>Марьина З. Г., Верещагин А. Ю., Новожилова А. В.</b> Исследование влияния схемы подключения алюминиевого радиатора марки STI на его теплотехнические характеристики .....	89

**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),*  
*Г.Н. УЗАКОВ (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),*  
*Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*Л. В. ШЕНЕЦ (РУП «Белинвестэнергосбережение», Минск, Республика Беларусь)*

**Ведущий стилистический редактор В. Н. Гурьянчик**

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

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

---

Подписано к печати 31.01.2022. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага мелованная.  
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.  
Дата выхода в свет . 2022. Заказ .

---

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.  
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.  
Тел.: +375 17 320-65-14  
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru  
<http://energy.bntu.by>

---

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022

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

PROCEEDINGS OF THE CIS  
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS  
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

**ENERGETIKA**

V. 65, No 1

2022

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL  
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

**Founder**

Ministry of Education of the Republic of Belarus

---

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

**CONTENTS**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

<b>Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A.</b> An Artificial Neural Network Developed in MATLAB-Simulink for Reconstruction a Distorted Secondary Current Waveform. Part 2 .....	5
<b>Dobrego K. V.</b> Symmetrical Resonance Mechanism of Elimination of Parasitic Torques of the Permanent Magnets Generator when Starting and Idling .....	22
<b>Schasny V. P., Zhukouski A. I.</b> Electromagnetic Compatibility of Compensating Devices and Converters of an Adjustable Electric Drive in Electrical Networks of Industrial Enterprises .....	37

HEAT POWER ENGINEERING

<b>Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V., Ryzhova T. N.</b> Numerical Analysis of the Characteristics of the Heat Treatment Process of Multilayer Composite Products in Heat Technology Installations .....	52
<b>Sorokin V. V.</b> Calculation of Start-Up Time of Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of Localization Safety System of a Nuclear Power Plant Equipped with VVER . . . .	67
<b>Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P.</b> Selection, Calculation and Thermodynamic Analysis of Turbine Units Based on the Organic Rankine Cycle .....	76
<b>Mar'ina Z. G., Vereshchagin A. Yu., Novozhilova A. V.</b> Study of the Influence of the Connection Mode of the STI Brand Aluminum Radiator on its Thermal Characteristics .....	89

**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*),  
G. N. UZAKOV (*Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan*),  
B. M. KHROUSTALEV (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),  
L. V. SHENETS (*RUE “Belinvestenergoberezhnie”, 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, 28<sup>th</sup>  
Reg. No 1257**

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

---

Passed for printing 31.01.2022. Dimension of paper 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Coated paper.  
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet . . .  
An edition of 100 copies. Date of publishing 2022. Order list . . .

---

**ADDRESS**

Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 320-65-14  
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru  
<http://energy.bntu.by>

---

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

© Belarusian National Technical University, 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-5-21>

УДК 621.316.925

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

Часть 2

**Ю. В. Румянцев<sup>1)</sup>, Ф. А. Романюк<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Искусственные нейронные сети все чаще используются в различных отраслях электроэнергетики, в том числе в релейной защите. Традиционные микропроцессорные устройства релейной защиты функционируют по принципу вычисления действующих значений контролируемых сигналов тока и напряжения и сравнения их с заранее заданными уставками. Однако вычисляемые действующие величины не всегда отражают реальные процессы, происходящие в защищаемом электрооборудовании, ввиду, например, насыщения трансформатора тока. В таком режиме вторичный ток имеет характерную искаженную форму, которая существенно отличается от идеальной (истинной). Это ведет к занижению вычисляемого релейной защитой действующего значения основной гармоники вторичного тока по сравнению с его истинной действующей величиной и приводит к затягиванию времени срабатывания или отказу функционирования устройств релейной защиты. Одно из перспективных приложений искусственной нейронной сети для целей релейной защиты – восстановление истинной формы сигнала вторичного тока трансформатора тока при его насыщении. В статье рассмотрены этапы реализации нейронной сети в среде MATLAB на примере ее обучения восстановлению искаженной формы вторичного тока. Выполнена проверка функционирования разработанных нейронных сетей в MATLAB-Simulink. С использованием пакета расширения SimPowerSystems реализована модель, позволяющая имитировать режим насыщения трансформатора тока, сопровождающийся искажением формы сигнала его вторичного тока, и ее последующее восстановление с помощью искусственных нейронных сетей. Полученные результаты подтвердили способность нейронных сетей практически полностью восстанавливать искаженную форму вторичного тока трансформатора тока. Применение обученных искусственных нейронных сетей в реальных устройствах релейной защиты представляется перспективным, поскольку обеспечивает повышение их быстродействия и надежности функционирования.

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

**Для цитирования:** Румянцев, Ю. В. Разработка в MATLAB-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока. Часть 2 / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 5–21. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-5-21>

---

### **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

---

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

Part 2

Yu. V. Rumiantsev<sup>1)</sup>, F. A. Romaniuk<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>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. The operation of the traditional microprocessor-based relay protection device is based on calculation the RMS values of the monitored current and voltage signals and its comparison with the predetermined thresholds. However, calculated RMS values often do not reflect the real processes occurring in the electrical equipment under protection due to, for example, current transformer saturation. In this case secondary current has a characteristic distorted waveform, which is significantly differs from its ideal (true) waveform. This causes underestimation of the calculated RMS value of the secondary current compared to its true value; also, it causes a trip time delay or even to a relay protection devices operation failure. In this regard, one of the perspective applications of the artificial neural network for the relay protection purposes is the current transformer distorted secondary current waveform restoration due to its saturation. 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 reconstruct the distorted secondary current waveform of the saturated current transformer. The functioning of the developed neural networks was verified in the MATLAB-Simulink environment; with the use of the SimPowerSystems component library a model was implemented which allow simulating the current transformer saturation, accompanied by the secondary current waveform distortion, and its further restoration using developed artificial neural networks. The obtained results confirmed the ability of the neural networks that had been developed to almost completely restore the distorted secondary current waveform. Thus, it seems promising to use pre-trained artificial neural networks in real relay protection devices, since such use will ensure the speed of real relay protection devices; their operation reliability will also increase.

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

**For citation:** Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A. (2022) An Artificial Neural Network Developed in MATLAB-Simulink for Reconstruction a Distorted Secondary Current Waveform. Part 2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 5–21. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-5-21> (in Russian)

### Введение

В первой части статьи [1] рассмотрены архитектура искусственной нейронной сети (ИНС) [2–6] и ее приложения к задачам релейной защиты (РЗ) [7, 8], наиболее перспективным из которых является восстановление искаженной формы вторичного тока трансформатора тока (ТТ) вследствие насыщения его магнитопровода [9–18].

Разработанная ИНС может использоваться в реальном темпе моделирования системы MATLAB-Simulink для получения на ее выходе на каждом шаге дискретизации (принят равным 32 отсчетам на период промышленной частоты) обновленного значения восстановленного вторичного тока ТТ при подаче на ее входы скользящего окна данных реального вторичного тока ТТ. Поэтому количество входов и выходов ИНС должно составлять 32 и 1 соответственно (рис. 1).

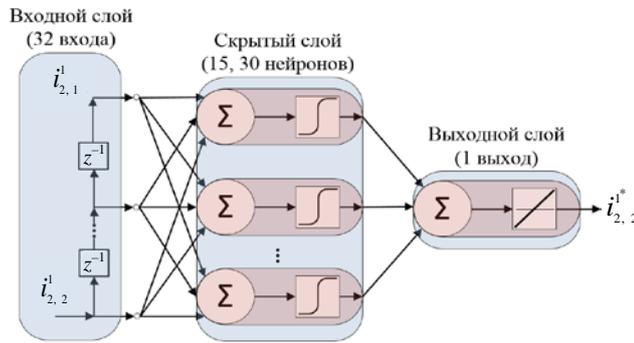


Рис. 1. Конфигурация искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока трансформатора тока

Fig. 1. Artificial neural network topology for reconstruction a current transformer distorted secondary current waveform

В реальном темпе моделирования за каждый период промышленной частоты значения на входах и выходе ИНС обновляются по 32 раза. Поэтому и обучающих пар, получаемых за время симуляции модели (один период промышленной частоты) [1, рис. 4], должно быть 32. Таким образом, в результате каждого запуска модели на время, равное двум периодам промышленной частоты, формировались 64 обучающие пары: первые 32 соответствуют скользящему окну сигнала вторичного тока ТТ в первом периоде, а оставшиеся 32 – во втором периоде. Наличие в наборе обучающих данных форм сигналов двух последовательных периодов промышленной частоты положительно сказывается на получаемой точности восстановления формы искаженного вторичного тока ТТ вследствие его насыщения.

Каждая пара обучающего набора данных должна содержать 32 выборки мгновенного вторичного тока ТТ в качестве входных значений и 1 выборку мгновенного первичного тока ТТ в качестве выходного значения, которое для текущего момента времени через коэффициент трансформации приводится ко вторичному току ТТ (истинное значение). При этом для каждой последующей формируемой пары входные значения задаются 31 старой (содержащейся в предыдущей обучающей паре) выборкой мгновенного вторичного тока ТТ и 1 новой – текущей выборкой, а выходное значение – 1 обновленной выборкой приведенного первичного тока ТТ.

Поскольку момент возникновения повреждения принят совпадающим с началом моделирования (т. е. считается, что в предшествующем режиме ток не протекал), первая формируемая обучающая пара содержит 31 нулевое и 1 текущее входное значение вторичного тока ТТ, вторая – 30 нулевых и 2 текущих и т. д.

С учетом вышеизложенного и принятой частоты дискретизации структура набора обучающих данных имеет вид

$$\left[ \left( \left\{ i_{2,1}^1, \dots, i_{2,1}^{32} \right\}, \left\{ i_{2id,1}^{32} \right\} \right), \left( \left\{ i_{2,1}^2, \dots, i_{2,1}^{32}, i_{2,2}^1 \right\}, \left\{ i_{2id,2}^1 \right\} \right), \right. \\ \left. \left( \left\{ i_{2,1}^3, \dots, i_{2,1}^{32}, i_{2,2}^1, i_{2,3}^1 \right\}, \left\{ i_{2id,3}^1 \right\} \right), \dots, \left( \left\{ i_{2,1}^{32}, i_{2,2}^1, i_{2,3}^1, \dots, i_{2,32}^1 \right\}, \left\{ i_{2id,32}^1 \right\} \right) \right],$$

где  $i_2$  – входные вторичные токи;  $i_{2id}$  – выходные (желаемые) значения токов обучающих пар.

В пакете Neural Network Toolbox системы MATLAB предусмотрен интуитивно понятный графический интерфейс, требующий от пользователя минимума действий при создании ИНС. Использование интерфейса налагает определенные ограничения на конфигурацию сети и иные специфические настройки ИНС, но позволяет ускорить процесс ее разработки. Кроме того, операции предварительной и постобработки [1] применяются к набору обучающих данных и выходным значениям ИНС автоматически. Для более детальной настройки процесса обучения ИНС рекомендуется пользоваться командной строкой MATLAB, позволяющей задавать все изменяемые параметры создаваемой ИНС по своему усмотрению. Несомненным преимуществом MATLAB является возможность экспортировать реализованную в ней ИНС в Simulink в виде блока модели и использовать совместно с другими блоками, а значит, применять ее в реальном темпе моделирования.

### Основная часть

С помощью разработанной в системе MATLAB-Simulink модели части энергосистемы [1, рис. 4] сформированы четыре набора обучающих данных, отличающихся принципом получения входных и соответствующих им выходных значений обучающих пар.

Для первого набора шаг изменения каждого параметра блока, моделирующего питающую эквивалентную систему, подбирался индивидуально, исходя из влияния степени его изменения на получаемую форму искаженного сигнала вторичного тока ТТ. Это позволило получить разнообразные формы вторичного тока ТТ, а также адекватный по размеру набор обучающих данных. Общее количество пар набора составило 86016, т. е. запуск модели осуществлялся 1344 раза, за каждый из которых формировались 64 обучающие пары.

Для второго набора каждая обучающая пара формировалась путем случайного изменения (с произвольным шагом в рамках определенного диапазона) каждого параметра блока, моделирующего питающую эквивалентную систему. Количество пар второго набора примет равным первому – 86016.

Третий набор получили в результате объединения первого и второго наборов обучающих данных. Таким образом, количество обучающих пар третьего набора  $86016 \cdot 2 = 172032$ .

Четвертый набор данных формировался на основе первого и второго, а именно: в качестве набора, непосредственно используемого для обучения ИНС, применялись все 86016 пар первого набора, а проверочные и тестовые наборы данных подбирались по принципу второго набора, т. е. случайным образом. Для четвертого набора, в отличие от предыдущих трех, применялось принудительное разделение на обучающий, проверочный и тестовый. Для первых трех наборов данных такое разделение осуществлялось автоматически и случайным образом в процессе обучения ИНС в используемом по умолчанию в пакете Neural Network Toolbox соотношении: 70 % от общего числа пар набора – непосредственно для обучения, по 15 % – в качестве проверочного и тестового наборов. Примем указанное соотношение и для четвертого набора, при этом количество пар, непосредственно используемых для обучения ИНС, будет составлять 86016, а количество пар проверочного и тестового наборов – по 18432. Таким образом, общее количество пар четвертого набора 122880.

### Вычислительный эксперимент

Каждый набор данных применялся для обучения двух ИНС с 15 и 30 нейронами в скрытом слое (рис. 1), осуществляемого методами ранней остановки (*early stopping (ES)*) и регуляризации (*Bayesian regularization (BR)*).

Оценку качества обучения ИНС удобно производить путем построения графика зависимости изменения ошибки обучения от количества эпох (числа прогонов всех пар набора данных через ИНС). Критерием ошибки часто выступает среднеквадратическая ошибка *mse*, которая при одном выходе ИНС определяется как

$$mse = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (i_{2id} - i_2^*)^2,$$

где  $N$  – количество пар набора;  $i_2^*$  – выходное значение ИНС.

Еще один показатель качества обучения – величина регрессии  $R$ , отражающая корреляцию между значениями на выходе ИНС и желаемыми. Числовая характеристика степени корреляции близка к единице, в случае если ИНС удалось аппроксимировать зависимость между входными и желаемыми значениями, и значительно меньше единицы, если ИНС не смогла аппроксимировать искомую зависимость.

При однократном обучении ИНС существует вероятность отыскания локального, а не глобального минимума ошибки *mse* (ввиду, например, неудачно выбранных произвольным образом значений начальных весов и смещений), поэтому обучение каждой ИНС проводилось по 10 раз [5]. Далее из 10 полученных значений *mse* выбиралось минимальное и заносилось в табл. 1 совместно с соответствующими показателями регрессии: для обучающего ( $R_1$ ), проверочного ( $R_2$ ) и тестового ( $R_3$ ) наборов данных применительно к методу *ES* и  $R_1$ ,  $R_3$  – для метода *BR*, поскольку для него проверочный набор не требуется. Присвоим каждой обучаемой ИНС цифро-буквенное обозначение (например, для пары, обучаемой на третьем наборе данных по методу *ES* и содержащей в скрытом слое 15 нейронов ИНС, – 3ES15).

Таблица 1

Полученные показатели качества обучения искусственной нейронной сети  
Performance indexes of an artificial neural network obtained in the study

№ набора	Методика	15 нейронов				30 нейронов				$mse_{15}/$ $mse_{30}$
		$mse_{15}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$mse_{30}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	
1	<i>ES</i>	469	0,9949	0,9947	0,9949	262	0,9972	0,9969	0,9969	1,9
	<i>BR</i>	370	0,9960	–	0,9956	90	0,9990	–	0,9989	3,7
2	<i>ES</i>	519	0,9950	0,9949	0,9947	457	0,9956	0,9954	0,9953	1,1
	<i>BR</i>	512	0,9951	–	0,9951	166	0,9984	–	0,9983	3,1
3	<i>ES</i>	643	0,9935	0,9934	0,9932	386	0,9961	0,9959	0,9957	1,7
	<i>BR</i>	523	0,9947	–	0,9945	128	0,9987	–	0,9986	4,1
4	<i>ES</i>	838	0,9910	0,9882	0,9880	473	0,9954	0,9904	0,9900	1,8
	<i>BR</i>	389	0,9959	–	0,9948	134	0,9986	–	0,9981	2,9

Увеличение количества нейронов скрытого слоя с 15 до 30 положительно сказывается на численных показателях качества обучения ИНС –

ошибка  $mse$  значительно уменьшается для всех наборов данных (табл. 1). При этом для метода  $BR$  ошибка  $mse$  в зависимости от набора данных сокращается с 2,9 до 4,1 раза, в то время как для  $ES$  – с 1,1 до 1,9 раза.

Для всех обученных ИНС, за исключением  $4ES15$ , показатель регрессии на тестовом наборе  $R_3$  превысил 0,993. Исходя из высоких значений  $R_3$ , можно заранее предположить, что все рассмотренные ИНС обладают высокой способностью к обобщению и, следовательно, смогут с приемлемой для целей РЗ точностью осуществлять восстановление искаженной формы сигнала вторичного тока ТТ.

В процессе вычислительного эксперимента выполнено обучение ИНС методами  $ES$  и  $BR$  с 10 нейронами в скрытом слое на тех же четырех наборах обучающих данных. Однако точность восстановления искаженной формы сигнала вторичного тока ТТ такими ИНС оказалась, по сравнению с рассматриваемыми, неудовлетворительной. При обучении ИНС с 40 нейронами в скрытом слое получены результаты, которые практически совпадают с достигнутыми при обучении ИНС с 30 нейронами, вследствие чего увеличение числа нейронов свыше 30 признано нецелесообразным.

В ходе исследования выявлено, что обучение с применением метода  $ES$  приводит к крайне нестабильным результатам: значение  $mse$  от обучения к обучению одной и той же ИНС может отличаться до 5 раз, что подтверждает необходимость многократного повторного обучения по данному методу с целью получения минимально возможной величины  $mse$ . При использовании метода  $BR$  разброс значений  $mse$  оказывается значительно меньше.

Таким образом, лучшие показатели качества обучения получены для ИНС  $1BR30$ , худшие – для  $4ES15$  (табл. 1). На рис. 2 в логарифмическом масштабе приведены изменения ошибок  $mse$  для обучающего, проверочного (только для  $4ES15$ ) и тестового наборов данных указанных ИНС.

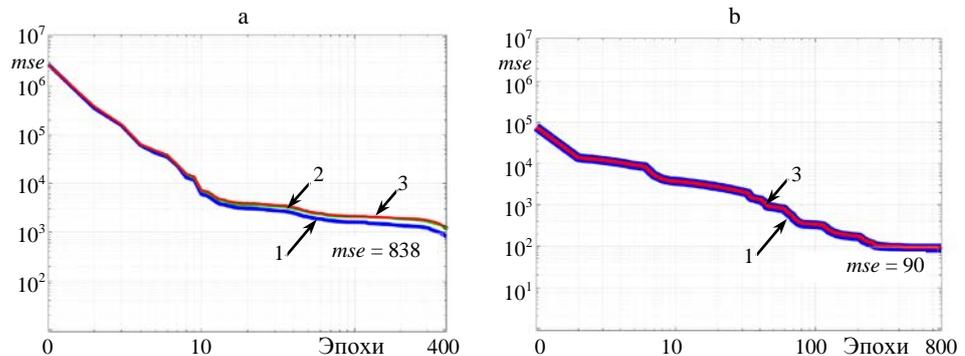


Рис. 2. Изменение ошибки  $mse$  в процессе обучения искусственной нейронной сети: а –  $4ES15$ ; б –  $1BR30$ ; 1 – обучающий; 2 – проверочный; 3 – тестовый наборов данных

Fig. 2.  $Mse$  error change during training progress: а –  $4ES15$ ; б –  $1BR30$ ; 1 – train dataset; 2 – validation dataset; 3 – test dataset

Примерно до 10-й эпохи происходит резкое снижение ошибки  $mse$  ИНС  $4ES15$  для всех наборов данных, далее – ее монотонное убывание с небольшими расхождениями между наборами (рис. 2а). В районе 390-й эпохи начинается резкое снижение значения  $mse$  на обучающем наборе и одновременно происходит снижение, а затем возрастание ошибки на

проверочном наборе данных (неочевидно из-за логарифмического масштаба графиков), что свидетельствует о начале переобучения ИНС. По прошествии 6 последовательных эпох (число по умолчанию для метода *ES* в пакете *Neural Network Toolbox*), сопровождающихся монотонным увеличением *mse* на проверочном наборе данных, обучение по методу *ES* останавливается и ИНС присваиваются значения весовых коэффициентов и смещений, при которых данная *mse* была минимальной. Ошибка для обучающего набора принимается  $mse = 838$ .

Остановка обучения и фиксация  $mse = 90$  для ИНС *1BR30* (рис. 2b) осуществляется в районе 800-й эпохи при минимизации методом *BR* значений весовых коэффициентов и смещений обучаемой ИНС.

Кривая изменения ошибки тестового набора располагается вплотную к кривым *mse* обучающего и проверочного наборов ИНС *4ES15* (рис. 2a), а для ИНС *1BR30* сливается с кривой изменения *mse* обучающего набора (рис. 2b), т. е. ошибки *mse* на каждом наборе данных примерно одинаковые. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов обучения ИНС.

Для наглядной оценки качества обучения приведены графики регрессии  $R_3$  для тестовых наборов ИНС *1BR30* и *4ES15*, на которых каждой паре соответствует одна точка с координатой по оси абсцисс, равной желаемому значению, а по оси ординат – значению на выходе ИНС (рис. 3). При высоком качестве обучения ИНС ее реальные выходные и желаемые значения из тестового набора должны практически совпадать, а соответствующие им точки располагаться вдоль выходящей из начала координат под углом  $45^\circ$  прямой.

Числовая характеристика регрессии для тестовых наборов ИНС *4ES15*  $R_3 = 0,9880$ , *1BR30*  $R_3 = 0,9989$ . Близость значений  $R_3$  к единице свидетельствует о том, что обе ИНС аппроксимировали искомую нелинейную зависимость и обладают высокой способностью к обобщению. Однако кучность расположения точек вдоль наклонной прямой у ИНС *4ES15* меньше, что свидетельствует о худших показателях качества обучения по сравнению с *1BR30*, для которой значения на выходе практически совпадают с желаемым (рис. 3). Иными словами, если какая-либо точка на графике регрессии значительно отклонена от наклонной прямой, значит, для данной пары тестового набора ИНС не смогла правильно определить выход.

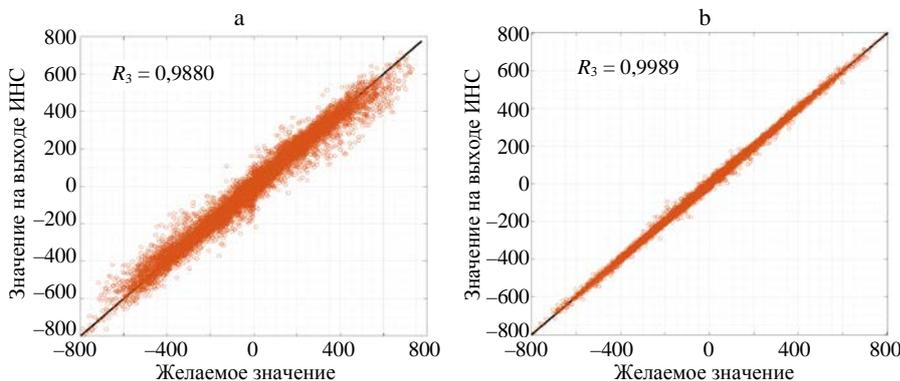


Рис. 3. График регрессии для тестового набора искусственной нейронной сети:  
a – *4ES15*; b – *1BR30*

Fig. 3. Regression plot for the test dataset: a – *4ES15*; b – *1BR30*

Рассмотрим функционирование полученных ИНС на примере их использования для восстановления искаженной формы сигнала вторичного тока ТТ вследствие его насыщения. Для каждого набора обучающих данных выбраны ИНС с лучшими и худшими показателями качества обучения. Параметры модели ТТ и диапазон изменений параметров энергосистемы приняты такими же, как и при формировании наборов обучающих данных [1]. Дополнительно для ТТ изменялось значение остаточной намагнитченности его магнитопровода  $B_{ост}$  в диапазоне 0–0,8 Тл.

На рис. 4 приведена разработанная в системе MATLAB-Simulink с использованием блоков пакета расширения SimPowerSystems модель части энергосистемы, в которой имитируется режим насыщения ТТ, сопровождающийся искажением формы сигнала его вторичного тока, и ее последующее восстановление рассмотренными выше ИНС. Обученные в Neural Network Toolbox ИНС экспортированы в Simulink в виде блоков их моделей – Neural network. На вход Input блока ИНС поступают выборки сигнала искаженного вторичного тока ТТ, а на выходе Output формируется соответствующее им восстановленное значение вторичного тока. Далее сигнал восстановленного вторичного тока ТТ поступает на осциллограф Scope и на вход Input блока цифрового фильтра Digital filter, где на выходе RMS формируется действующее значение основной (первой) гармоники указанного сигнала, также поступающее на осциллограф Scope. Описание остальных блоков модели приведено в [1].

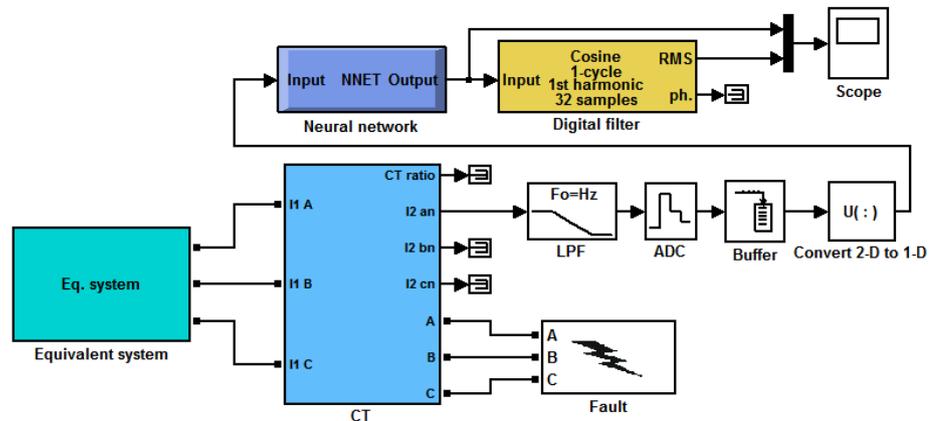


Рис. 4. Разработанная в MATLAB-Simulink модель для восстановления с использованием искусственной нейронной сети формы сигнала искаженного вторичного тока трансформатора тока

Fig. 4. MATLAB-Simulink based model for a current transformer distorted secondary current waveform reconstruction using artificial neural networks

Результаты исследований представлены на рис. 5–8.

ИНС позволяют практически полностью восстановить искаженную форму сигнала вторичного тока ТТ до ее идеального (истинного) значения в широком диапазоне изменения параметров энергосистемы. Несмотря на существенное отличие ошибки *mse* (от 3,12 до 6,25 раза) ИНС с худшими и лучшими показателями качества обучения для каждого набора обучающих данных, точность восстановления сигналов существенно не изменяется.

При этом разница вычисляемых действующих значений основных гармоник восстановленных вторичных токов по сравнению с их истинным действующим значением ни в одном из рассмотренных случаев не превышает 10 %.

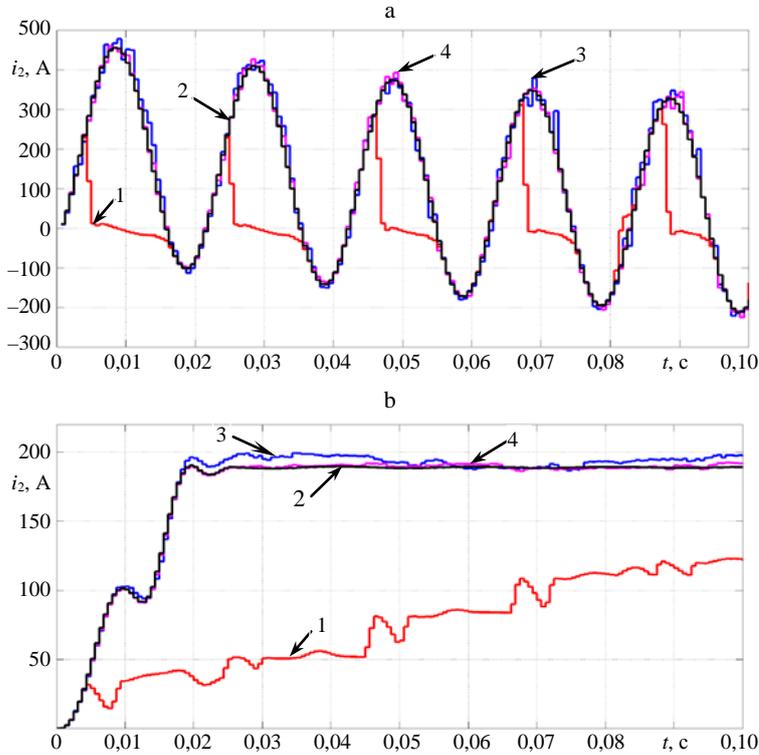


Рис. 5. Сравнение результатов восстановления искаженной формы вторичного тока трансформатора тока при  $I_{сз} = 22705$  А,  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\tau = 0,071$  с,  $B_{ост} = 0,165$  Тл:  
а – мгновенные значения; б – действующие значения основной гармоники;  
1, 2 – реальный и идеальный вторичные токи; 3 – восстановленный 1ES15 вторичный ток;  
4 – восстановленный 1BR30 вторичный ток

Fig. 5. Comparison of the current transformer distorted secondary current waveform reconstruction results at  $I_{sc} = 22705$  A,  $\varphi = 35^\circ$ ,  $\tau = 0.071$  s,  $B_{rem} = 0.165$  T:  
а – instantaneous values; б – RMS values of the fundamental frequency component;  
1, 2 – real and ideal secondary current; 3 – reconstructed by 1ES15 secondary current;  
4 – reconstructed by 1BR30 secondary current

Насыщение ТТ приводит к тому, что его реально протекающий вторичный ток имеет характерную искаженную форму (рис. 5а, 6а, 7а, 8а, кривая 1), существенно отличающуюся от идеальной формы (рис. 5а, 6а, 7а, 8а, кривая 2), т. е. от такой, ток которой протекал бы во вторичных цепях ТТ и подводился к устройствам РЗ при отсутствии насыщения. В результате происходит занижение вычисляемого цифровым фильтром в составе устройства РЗ действующего значения основной гармоники реально протекающего вторичного тока (рис. 5б, 6б, 7б, 8б, кривая 1) по сравнению с ее идеальным действующим значением (рис. 5б, 6б, 7б, 8б, кривая 2).

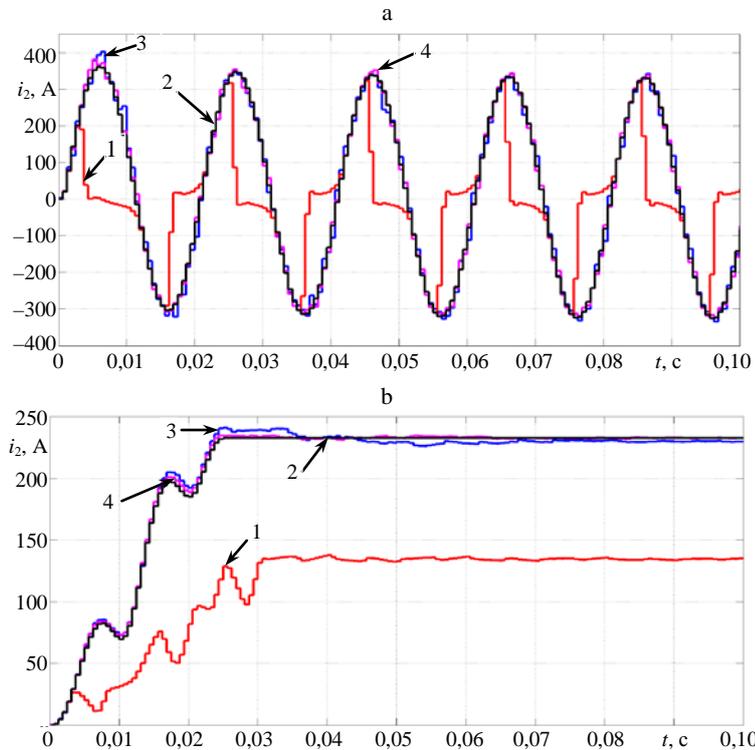


Рис. 6. Сравнение результатов восстановления искаженной формы вторичного тока трансформатора тока при  $I_{кз} = 28044$  А,  $\varphi = 78^\circ$ ,  $\tau = 0,035$  с,  $B_{ост} = 0,053$  Тл: а, б, 1, 2 – то же, что и на рис. 5; 3 – 2ES15; 4 – 2BR30

Fig. 6. Comparison of the current transformer distorted secondary current waveform reconstruction results at  $I_{sc} = 28044$  A,  $\varphi = 78^\circ$ ,  $\tau = 0.035$  s,  $B_{rem} = 0.053$  T: а, б, 1, 2 – the same as in the Fig. 5; 3 – 2ES15; 4 – 2BR30

Таким образом, вычисляемое действующее значение основной гармоники реального вторичного тока если и достигает своего идеального значения (что соответствует моменту времени выхода ТТ из режима насыщения), то это происходит на 5 и более периодов промышленной частоты позже, чем вычисляемое действующее значение сигнала вторичного тока, восстановленного любой из рассмотренных ИНС (рис. 5б, 6б, 7б, 8б, кривые 3, 4). При этом традиционными микропроцессорными устройствами токовой РЗ вычисляются именно действующие значения основной гармоники реального вторичного тока, что приводит к значительному затягиванию времени срабатывания РЗ или вовсе к отказу ее функционирования при насыщении ТТ [1]. Указанное происходит ввиду того, что действующее значение может быть значительно ниже заданных уставок срабатывания, которые, в свою очередь, рассчитываются исходя из условия идеальной трансформации (насыщение ТТ не учитывается) первичного тока повреждения во вторичные цепи ТТ (рис. 5а, 6а, 7а, 8а, кривая 2).

Использование ИНС для целей восстановления искаженного вторичного тока ТТ в устройствах РЗ позволит их цифровым фильтрам осуществлять вычисление такого действующего значения основной гармоники вос-

становленного сигнала вторичного тока ТТ, которое будет максимально приближено к своему идеальному значению, что обеспечит повышение быстродействия и надежности функционирования устройств РЗ по сравнению с их традиционной реализацией.

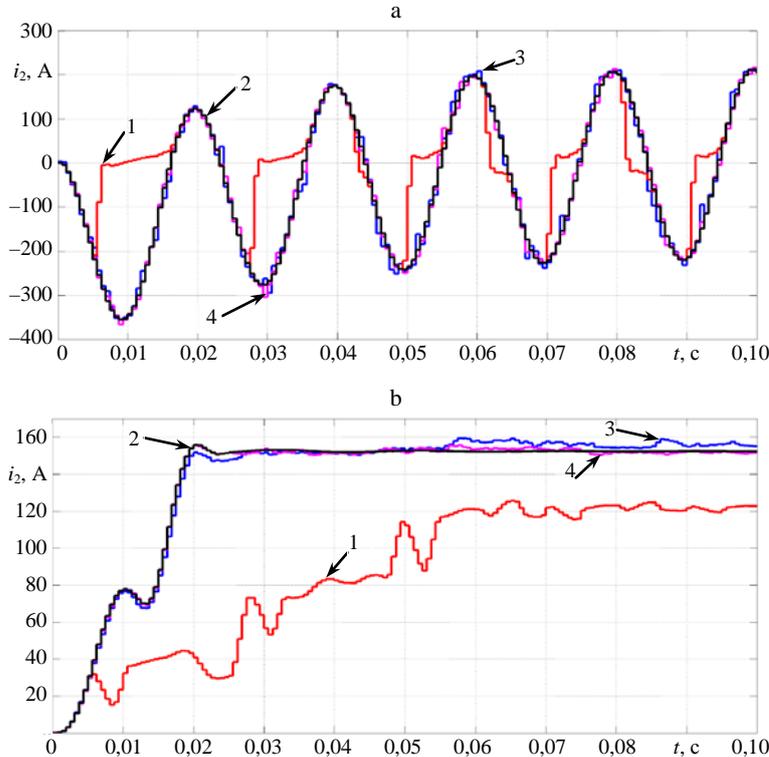


Рис. 7. Сравнение результатов восстановления искаженной формы вторичного тока трансформатора тока при  $I_{кз} = 18451$  А,  $\varphi = 195^\circ$ ,  $\tau = 0,024$  с,  $B_{ост} = 0,023$  Тл: а, б, 1, 2 – то же, что и на рис. 5; 3 – 3ES15; 4 – 3BR30

Fig. 7. Comparison of the current transformer distorted secondary current waveform reconstruction results at  $I_{sc} = 18451$  A,  $\varphi = 195^\circ$ ,  $\tau = 0.024$  s,  $B_{rem} = 0.023$  T: а, б, 1, 2 – the same as in the Fig. 5; 3 – 3ES15; 4 – 3BR30

Даже если восстановленный ИНС сигнал имеет выбросы или не точно следует форме идеального вторичного тока ТТ, оценивать качество функционирования и применимость такой ИНС следует именно по вычисляемым действующим значениям основной гармоники восстановленного сигнала, поскольку на основании результатов сравнения именно действующего значения с уставкой устройства РЗ приходят в действие. В связи с этим можно сделать вывод, что наиболее удобным и информативным показателем оценки качества обучения ИНС является значение регрессии тестового набора  $R_3$ . Согласно результатам вычислительного эксперимента и данным табл. 1, приемлемая точность восстановления вторичного тока ТТ обеспечивается при  $R_3 > 0,9900$ . Это свидетельствует о том, что все предложенные способы формирования наборов обучающих данных могут быть успешно использованы в процессе обучения ИНС.

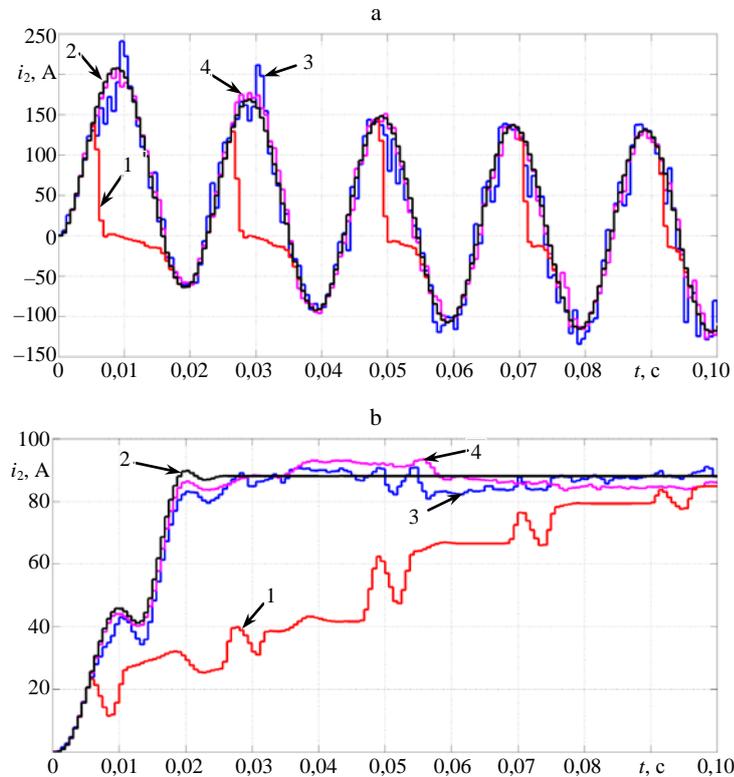


Рис. 8. Сравнение результатов восстановления искаженной формы вторичного тока трансформатора тока при  $I_{кз} = 10628$  А,  $\varphi = 24^\circ$ ,  $\tau = 0,032$  с,  $B_{ост} = 0,454$  Тл:  
а, б, 1, 2 – то же, что и на рис. 5; 3 – 4ES15; 4 – 4BR30

Fig. 8. Comparison of the current transformer distorted secondary current waveform reconstruction results at  $I_{sc} = 10628$  A,  $\varphi = 24^\circ$ ,  $\tau = 0.032$  s,  $B_{rem} = 0.454$  T:  
а, б, 1, 2 – the same as in the Fig. 5; 3 – 4ES15; 4 – 4BR30

Наилучшие показатели качества обучения достигнуты для ИНС 1BR30 с использованием первого набора данных. Обучающий набор сигналов получен путем изменения значений параметров модели (с выбранным шагом в рамках определенного диапазона), влияющих на форму сигнала. Тем самым достигается равномерная оцифровка всего диапазона изменения форм сигнала вторичного тока, что положительно сказывается на показателях качества обучения ИНС.

При невозможности априорной оценки влияния величины шага изменения параметров модели на форму получаемого сигнала оправданным является использование способа, применявшегося для формирования второго набора обучающих данных и заключающегося в случайном изменении (в рамках определенного диапазона) шага значений параметров модели, влияющих на форму получаемого сигнала.

Использование остальных рассмотренных способов формирования наборов обучающих данных не привело к существенному повышению показателей качества обучения.

Исходя из вышеизложенного, рекомендуется применять способы формирования первого и второго наборов обучающих данных и регуляризацию (*BR*) как метод обучения.

Отметим еще одну важную и неочевидную особенность. Рассмотренные ИНС могут применяться для восстановления вторичного тока не только ТТ1, с использованием которого получены наборы обучающих данных, но и ТТ2 с отличным от ТТ1 коэффициентом трансформации. Основное условие заключается в том, чтобы действующее значение тока повреждения  $I_{кз}$  находилось в диапазоне  $(0,5I_{ном}K_{ном} - 3I_{ном}K_{ном})$  А, где значение параметра  $I_{ном}$  относится к ТТ2, а параметр  $K_{ном}$  – к ТТ1 [1].

Сравним функционирование ИНС *1BR30* с лучшими и *4ES15* с худшими показателями качества обучения на примере восстановления ими искаженного вторичного тока ТТ2 с  $I_{ном} = 300$  А (рис. 9). Остальные вторичные параметры приняты такими же, как и для рассмотренного выше ТТ1 с  $I_{ном} = 600$  А.

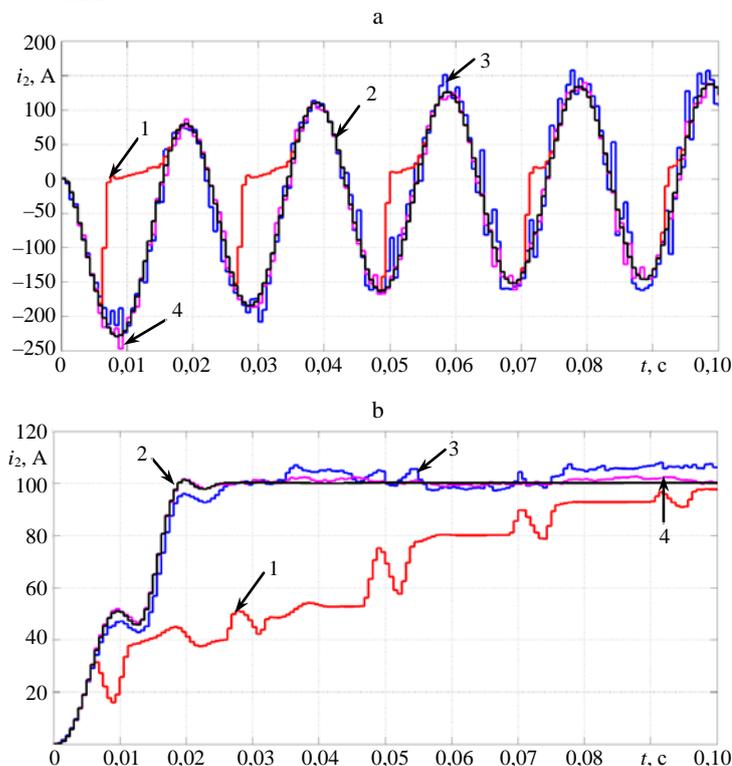


Рис. 9. Сравнение результатов восстановления искаженной формы вторичного тока трансформатора тока с  $I_{ном} = 300$  А при  $I_{кз} = 6044$  А,  $\varphi = 209^\circ$ ,  $\tau = 0,029$  с,  $B_{ост} = 0,221$  Тл:  
а, б, 1, 2 – то же, что и на рис. 5; 3 – *4ES15*; 4 – *1BR30*

Fig. 9. Comparison of the current transformer with  $I_{ном} = 300$  А distorted secondary current waveform reconstruction results at  $I_{кз} = 6044$  А,  $\varphi = 209^\circ$ ,  $\tau = 0.029$  s,  $B_{rem} = 0.221$  T:  
а, б, 1, 2 – the same as in the Fig. 5; 3 – *4ES15*; 4 – *1BR30*

Как видно из рис. 9, обе ИНС успешно произвели восстановление формы сигнала вторичного тока ТТ2 с отличным от ТТ1 коэффициентом

трансформации. Вычисляемые действующие значения основных гармоник восстановленных вторичных токов, как и на рис. 5–8, отличаются не более чем на 10 % от истинных действующих значений.

Для успешного применения ИНС в реальных условиях эксплуатации устройств РЗ ее обучение должно осуществляться на формах сигнала вторичного тока ТТ, максимально приближенных к реальным. В связи с этим модель ТТ для формирования набора обучающих данных должна точно воспроизводить как моменты входа и выхода ТТ из насыщения, так и форму сигнала вторичного тока между ними. Точность в основном зависит от способа задания нелинейных свойств магнитопровода, определяемых характеристикой намагничивания. Например, при использовании прямоугольной характеристики намагничивания (ПХН) или спрямленной характеристики намагничивания (СХН) [19] вторичный ток ТТ между участками точной трансформации будет спадать скачкообразно, и точка выхода из насыщения всегда будет располагаться на его положительных полуволнах, что не соответствует его реальной (плавно затухающей) форме. Указанное происходит из-за того, что при аппроксимации реальной характеристики намагничивания по методу ПХН и СХН участок области насыщения заменяется горизонтальной прямой, что равносильно замене в схеме замещения ТТ его ветви намагничивания идеальным ключом без индуктивностей, который и обуславливает возможность скачкообразного изменения вторичного тока ТТ.

Учет нелинейных свойств магнитопровода в модели ТТ должен осуществляться путем кусочно-линейной аппроксимации средней характеристики намагничивания (или иной пропорциональной ей характеристики) [20], либо следует проводить полноценное моделирование явления гистерезиса [21, 22], что позволяет реалистично воспроизводить форму сигнала вторичного тока ТТ при насыщении его магнитопровода. Даже аппроксимация двумя наклонными прямыми с правильно выбранным наклоном второй прямой в области глубокого насыщения позволяет получать реалистичные результаты [23]. Модель ТТ также должна отражать реальную схему их соединений, так как в действительности к устройствам РЗ подводятся вторичные токи от трехфазной группы ТТ, соединенных по схеме «звезда с нулевым проводом». Вторичные токи данной группы ТТ при некоторых видах повреждений, сопровождающихся насыщением ТТ, отличаются по форме от вторичных токов одиночных ТТ при тех же условиях [24–26].

ИНС, разработанные в специализированных средах моделирования, например MATLAB, могут транслироваться в оптимизированные для микропроцессоров машинные коды и впоследствии использоваться в реальных устройствах РЗ для цифровой обработки сигналов и построения усовершенствованных алгоритмов их функционирования.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что искусственные нейронные сети могут успешно использоваться для восстановления искаженной формы сигнала вторичного тока трансформатора тока вследствие насыщения его магнитопровода с приемлемой для целей релейной защиты точностью.

2. На основании полученных результатов вычислительного эксперимента установлены оптимальные способы формирования набора обучающих данных искусственной нейронной сети и метод ее обучения.

3. Определены требования, предъявляемые к модели трансформатора тока, используемой для формирования набора обучающих данных искусственной нейронной сети.

4. Разработанные искусственные нейронные сети могут использоваться в реальных устройствах релейной защиты для цифровой обработки сигналов и построения усовершенствованных алгоритмов их функционирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Румянцев, Ю. В. Разработка в MATLAB-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока. Ч. 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>.
2. Haykin, S. *Neural Networks and Learning Machines* / S. Haykin; 3<sup>rd</sup> Ed. New Jersey: Pearson Education Inc., 2009. 936 p. <https://doi.org/10.1007/BF02551274>.
3. Cybenko, G. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function / G. Cybenko // *Mathematics of Control, Signals, and Systems*. 1989. Vol. 2. P. 303–314. <https://doi.org/10.1007/BF02551274>.
4. *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](http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/nnet.pdf).
5. *Neural Network Design* / M. T. Hagan [et al.], 2<sup>nd</sup> Ed. Boston: PWS Publishing, 2014. 1012 p.
6. Медведев, В. С. Нейронные сети. *MatLab 6* / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. М.: Диалог-МИФИ, 2002. 496 с.
7. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
8. 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>.
9. 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>.
10. 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>.
11. 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>.
12. Rebizant, W. *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control* / W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski. London: Springer, 2011. 316 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-802-7>.
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*. 2001. 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*. 2006. Vol. 21, Iss. 1. P. 73–79. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.858799>.
15. Lukowicz, M. Artificial Neural Network Based Dynamic Compensation of Current Transformer Errors / M. Lukowicz, E. Rosolowski // *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems*. 2000. P. 19–24.

16. Haghjoo, F. Compensation of CT Distorted Secondary Current Waveform in Online Conditions / F. Haghjoo, M. H. Pak // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016. Vol. 31, Iss. 2. P. 711–720. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2448634>.
17. Application of ANN Methods for Instrument Transformer Correction in Transmission Line Protection / M. M. Saha [et al.] // *Developments in Power System Protection, 7<sup>th</sup> International Conference*. 2001. P. 303–306. <https://doi.org/10.1049/cp:20010160>.
18. 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/PSS.2000.868725>.
19. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите / А. Д. Дроздов [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1986. 255 с.
20. Kojovic, L. A. Comparison of Different Current Transformer Modeling Techniques for Protection System Studies / L. A. Kojovic // *Power Engineering Society Summer Meeting*. 2002. Vol. 3. P. 1084–1089. <https://doi.org/10.1109/PSS.2002.1043427>.
21. Annakkage, U. D. A Current Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis / U. D. Annakkage, P. G. McLaren // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2000. Vol. 1, Iss. 1. P. 57–61. <https://doi.org/10.1109/61.847229>.
22. Lucas, J. R. Simulation of BH Excursions for Transient Studies / J. R. Lucas, P. G. McLaren // *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Midwest Symposium on Circuits and Systems*. 1990. P. 370–373. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.1990.140730>.
23. Kezunovic, M. Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study / M. Kezunovic, L. A. Kojovic // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1994. Vol. 9, Iss. 1. P. 405–413. <https://doi.org/10.1109/61.277712>.
24. Prochazka, M. Modeling of Current Transformers under Saturation Conditions / M. Prochazka // *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2011. Vol. 5, Iss. 1. P. 94–97.
25. 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.
26. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.

Поступила 29.10.2021 Подписана в печать 27.12.2021 Опубликована онлайн 31.01.2022

#### REFERENCES

1. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (6), 479–491. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-479-491> (in Russian).
2. Haykin S. (2009) *Neural Networks and Learning Machines*. 3<sup>rd</sup> Ed. Pearson Education Inc. 936.
3. Cybenko G. (1989) Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2, 303–314. <https://doi.org/10.1007/BF02551274>.
4. *Neural Network Toolbox. User's Guide. Version 4* (2002). The MathWorks. Available at: [http://cda.psych.uiuc.edu/matlab\\_pdf/nnet.pdf](http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/nnet.pdf).
5. Hagan M. T., Demuth H. B., Bale M. H., De Jesus O. (2014) *Neural Network Design*. 2<sup>nd</sup> Ed. Boston: PWS Publishing. 1012.
6. Medvedev V. S., Potemkin V. G. (2002). *Neural Networks. MatLab 6*. Moscow, Dialog-MIFI Publ. 496. (in Russian).
7. 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).
8. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Formation of Orthogonal Components of Input Currents in Microprocessor Protections of Electrical Equipment. *Energetika. 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).
9. 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>.
  10. 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>.
  11. 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>.
  12. Rebizant W., Szafran J., Wiszniewski A. (2011) *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. London, Springer Publ. 316. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-802-7>.
  13. Yu D. C., Cummins J. C., Wang Zh., Yoon H.-J., Kojovic L. A. (2001) 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. (2006) 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. Lukowicz M., Rosolowski E. (2000) Artificial Neural Network Based Dynamic Compensation of Current Transformer Errors. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems*, 19–24.
  16. Haghjoo F., Pak M. H. (2016) 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>.
  17. 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, 7<sup>th</sup> International Conference*, 303–306. <https://doi.org/10.1049/cp:20010160>.
  18. 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>.
  19. Drozdov A. D., Zasyplin A. S., Kuzhekov S. L., Platonov V. V., Podgornyi E. V. (1986) *Electric Circuits with Ferromagnetic Cores in Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 255 (in Russian).
  20. Kojovic L. A. (2002) Comparison of Different Current Transformer Modeling Techniques for Protection System Studies. *Power Engineering Society Summer Meeting*, 3, 1084–1089. <https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043427>.
  21. Annakkage U. D., McLaren P. G. (2000) A Current Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1 (1), 57–61. <https://doi.org/10.1109/61.847229>.
  22. Lucas J. R., McLaren P. G. (1990) Simulation of BH Excursions for Transient Studies. *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 370–373. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.1990.140730>.
  23. Kezunovic M., Kojovic L. A. (1994) Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9 (1), 405–413. <https://doi.org/10.1109/61.277712>.
  24. Prochazka M. (2011) Modeling of Current Transformers under Saturation Conditions. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 5 (1), 94–97.
  25. 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).
  26. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protections: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, BNTU. 168 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-22-36>

УДК 621.313.8

## **Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при трогании и на холостом ходу**

**К. В. Доброго<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** «Залипание» и вибрации статора генератора на постоянных магнитах приводят к его усиленному износу, шумности, снижению эффективности работы. В статье теоретически рассмотрена возможность устранения момента трогания и осцилляций момента вращения генератора на постоянных магнитах без нагрузки за счет взаимной компенсации взаимодействия катушек с полем постоянных магнитов при определенной симметрии этого поля. Данное явление названо пи-резонансом. Для заданного класса модельных потенциалов взаимодействия поля постоянных магнитов и катушек показано, что полная компенсация наступает при определенном числе катушек ( $N_s$ ) и магнитов ( $N_r$ ), в то время как для прочих комбинаций  $\{N_s, N_r\}$  взаимодействие носит характер осцилляций. Приведены соответствующие таблицы для различных классов потенциалов, которые могут служить основой для принятия конструкторских решений при создании генераторов. Пи-резонанс реализуется с большей вероятностью для четного числа катушек статора и нечетного числа магнитов, а также при увеличении числа катушек статора. Рассмотрены случаи как одностороннего, так и двустороннего расположения статоров относительно ротора. Численным моделированием показано, что пи-резонанс легко разрушается, в случае если размещение магнитов или катушек выполнено неточно, а также при внесении асимметрии в потенциал магнитного поля. Погрешность в угловом расположении катушек в  $1^\circ$  может привести к появлению существенного «зацепления» ротора с энергией порядка энергии взаимодействия изолированной пары магнит – катушка. К аналогичному по масштабу результату приводит нарушение симметрии потенциала, соответствующее добавлению пилообразной функции амплитудой 10 % от амплитуды симметричного периодического потенциала. Найденные закономерности могут быть использованы при проектировании эффективных генераторов с низким уровнем шума и вибраций.

**Ключевые слова:** момент трогания, генератор, магнит, неравномерность момента, паразитные моменты

**Для цитирования:** Доброго, К. В. Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при трогании и на холостом ходу / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 22–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-22-36>

---

**Адрес для переписки**

Доброго Кирилл Викторович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 368-11-57  
dobrego@vak.gov.by

**Address for correspondence**

Dobrego Kirill V.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 368-11-57  
dobrego@vak.gov.by

---

## Symmetrical Resonance Mechanism of Elimination of Parasitic Torques of the Permanent Magnets Generator when Starting and Idling

K. V. Dobrego<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** “Sticking” and vibrations of the stator of permanent magnet generators cause their increased wear, noise; also, their operation efficiency decreases. The article theoretically considers the possibility of eliminating the starting torque and oscillation of the rotation torque of the generator with permanent magnets without load due to mutual compensation of the interaction of coils with the field of permanent magnets at a certain symmetry of this field. The mentioned phenomenon is called pi-resonance. For the specified class of model interaction potentials of the field of permanent magnets and coils, it has been shown that full compensation occurs with a certain number of coils ( $N_s$ ) and magnets ( $N_r$ ), while for other combinations of  $\{N_s, N_r\}$  the interaction is in the nature of oscillations. The corresponding tables for various classes of potentials are given which can serve as a basis for making design decisions when developing generators. Pi-resonance more probably takes place in the case of even number of stator coils and odd number of magnets, as well as with an increase in the number of stator coils. The cases of both one-sided and two-sided arrangement of the stator relative to the rotor are considered. Numerical modelling has shown that the pi-resonance is easily destroyed if the placement of magnets or coils is inaccurate, as well as by the magnet field potential symmetry breaking. An error in the angular arrangement of the coils of  $1^\circ$  can result in the appearance of a significant “cogging” of the rotor with energy of the order of the interaction energy of an isolated magnet – coil pair. A distortion of the symmetry of the potential yields a result similar in scale which is equivalent to the adding of a rump function with the amplitude of 10 % of the amplitude of the symmetric periodic potential. The patterns that have been discovered can be used in the design of efficient generators with reduced level of noise and vibration.

**Keywords:** starting torque, generator, magnet, torque ripple, parasitic torques

**For citation:** Dobrego K. V. (2022) Symmetrical Resonance Mechanism of Elimination of Parasitic Torques of the Permanent Magnets Generator when Starting and Idling. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 22–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-22-36> (in Russian)

### Введение

Ненулевой момент трогания генератора на постоянных магнитах от первичного движителя и осцилляции (подергивания) момента вращения при его работе – известные явления, обусловленные неравномерностью магнитного поля и силового взаимодействия магнитов с катушками индуктивности (сердечниками катушек), относимые к паразитным моментам [1]. С ними борются за счет различных конструктивных решений статора и ротора [2, 3], в том числе путем детального моделирования конструкций электрических машин с помощью современных компьютеров и программных средств [3–5]. Однако если ставить целью создание максимально простого, дешевого и эффективного генератора, целесообразно рассмотреть фундаментальные аспекты названных явлений.

Объектом исследования выбран синхронный электрогенератор небольшой мощности торцевой конфигурации с приводом от ветроколеса, ротором на постоянных магнитах и статором с отдельными (разнесенными)

катушками индуктивности. Для повышения индуктивности катушки могут снабжаться ферромагнитными сердечниками, взаимодействующими с постоянными магнитами ротора. Задача – свести к нулю паразитные моменты и тем самым качественно улучшить генератор. Такая же задача возникает и при нагружении генератора, когда к статическому добавляется динамический компонент взаимодействия и необходимо обеспечить плавный ход ротора при постоянном вращательном моменте на валу и стабильной нагрузке.

Проблема паразитных моментов и способов борьбы с ними хорошо известна и актуальна не только для генераторов, но и для электродвигателей [6]. Однако ввиду сложности устройства реальных электрических машин ее рассмотрение и решение в общем виде практически невозможно. В ряде источников, например в [1], обсуждается вопрос паразитных моментов, указывается на необходимость соблюдения определенных ограничений на отношение количества пазов ротора и статора асинхронной машины, связанных с резонансными явлениями. Такие рекомендации следуют из опыта, накопленного при проектировании электрических машин, и не охватывают многие общие и частные случаи.

Имеется большой массив патентов, предлагающих технические решения для уменьшения неравномерности момента вращения [7–9], а также исследований, посвященных моделированию работы моторов и генераторов, включая подергивания, неравномерности момента (*cogging*, *torque ripple*) в системе статор – ротор с постоянными магнитами [2–5]. В научных публикациях представлено, как правило, детальное 2–3-мерное моделирование электромагнитного поля, токов, сил и даже температур с помощью полного набора соответствующих уравнений электромагнитного поля, индукции, энергии и др. Такие модели используют для оптимизации геометрии магнитов и катушек, конструкции всей системы, подбора материалов. Это позволяет получить достаточно точную количественную информацию о работе электрической машины. Однако первостепенной представляется задача качественного анализа системы и базовых закономерностей возникновения осцилляции момента вращения. Подобных исследований в доступной современной литературе автором не обнаружено.

В статье используется эвристический метод исследования – на основе численных экспериментов с рядом модельных систем сделаны обобщающие выводы, имеющие практическое и теоретическое значение.

Методом численного анализа исследованы качественные закономерности силового взаимодействия постоянных магнитов ротора и ферромагнитных сердечников статора как системы. Взаимодействие описывается модельными периодическими потенциалами. Показано, что в рамках рассмотренных классов потенциалов силовое взаимодействие определяется числом сердечников и магнитов  $\{N_s, N_r\}$  и может иметь вид периодической функции различной амплитуды либо обращаться в нуль. Эффект исчезновения (радикального уменьшения) вышеуказанных паразитных моментов при определенной конфигурации магнитно-механической системы статор – ротор назван  $\pi$ -резонансом, что подчеркивает циклический характер

потенциалов взаимодействия статора и ротора и определенную аналогию с волновыми резонансными явлениями. Построены соответствующие таблицы для различных классов потенциалов. Рассмотрено влияние погрешности расположения сердечников на плоскости статора, а также потери симметрии потенциала на разрушение пи-резонанса. Показано, что случайное отклонение сердечников от геометрически точной позиции быстро разрушает пи-резонанс, и при угловом разбросе положения порядка  $1^\circ$  амплитуда энергии сцепления может стать близкой к энергии взаимодействия отдельной пары магнит – сердечник. К аналогичному результату приводит нарушение симметрии магнитного поля.

### Основная часть

Рассмотрим систему, представляющую собой соосные дискообразные статор и ротор. На статоре смонтированы плоские катушки с сердечниками из ферромагнитного материала, на роторе закреплены плоские магниты (рис. 1).

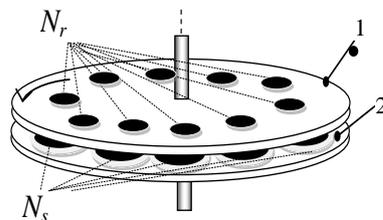


Рис. 1. Схема магнитно-механической системы статор – ротор:

1 – ротор с  $N_r$  вмонтированными постоянными магнитами;

2 – статор с  $N_s$  раздельными (разнесенными) катушками

Fig. 1. Chart of the magnetic-mechanical stator – rotor system:

1 – rotor with  $N_r$  incorporated permanent magnets; 2 – stator with  $N_s$  separated coils

Каждый сердечник находится в коллективном магнитном поле системы, конфигурация которого предполагается неизменной во времени, и при вращении ротора испытывает периодическое силовое взаимодействие (притяжение) с постоянными магнитами. Физическую картину можно описать при помощи периодического потенциала  $U(\gamma)$ , которым обладает каждый сердечник в магнитном поле системы. Термин «потенциал» используем в смысле потенциальной механической энергии взаимодействия как функции единственной степени свободы – угла поворота ротора  $\gamma$ . Сила взаимодействия направлена в сторону минимума потенциала и пропорциональна его градиенту. Абсолютное значение потенциала не важно для рассматриваемой задачи, а его геометрическая конфигурация соответствует особенностям анализируемой системы. Например, расширенная вершина и зауженное дно потенциала соответствуют ситуации узкого источника поля и широкого сердечника. Физически адекватными могут считаться достаточно гладкие периодические симметричные (в рамках одного периода) функции потенциала. В качестве модельных потенциалов выберем функцию синуса и ряд функций – производных от синуса, обладающих необходимыми качественными особенностями:

$$U(\gamma) = \sin \gamma; \quad (1)$$

$$U(\gamma) = |\sin \gamma|^{1/n} \operatorname{sign}(\sin \gamma); \quad (2)$$

$$U(\gamma) = |\sin \gamma|^n \operatorname{sign}(\sin \gamma); \quad (3)$$

$$U(\gamma) = [\sin(\gamma/2)]^{2n}, \quad (4)$$

где  $n$  – целое положительное число.

Аргумент функций (4) делится на два для согласования числа минимумов с числом магнитов  $N_r$ . Функции (2)–(4) при различных  $n$  могут рассматриваться как базис для аппроксимации более сложных функций потенциала. Функции (2), (3) имеют точечные устранимые разрывы первого рода при нулевом значении, однако это не существенно для численного моделирования. Функции типа (3) имеют шесть точек перегиба на периоде, что не характерно для рассматриваемой системы. Заметим, что данные функции представимы конечными рядами Фурье. Для наглядности потенциалы (1)–(4) (два периода) показаны на рис. 2.

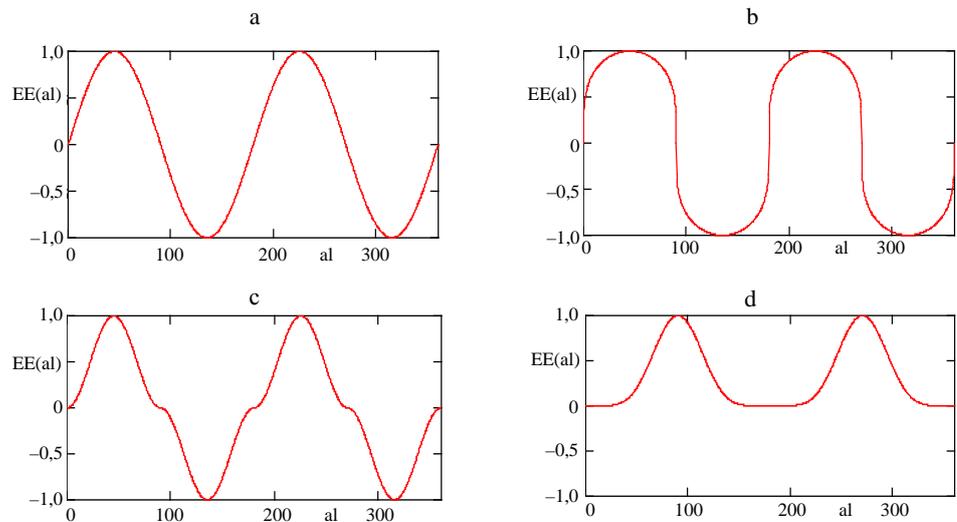


Рис. 2. Модельные периодические симметричные потенциалы:  
а – синусоидальный (1); б – (2); с – (3); д – (4)

Fig. 2. Model functions of periodic symmetrical potentials:  
а – sinusoidal (1); б – (2); с – (3); д – (4)

Исследуем качественные особенности взаимодействия статор – ротор для различных модельных потенциалов.

Предполагаем, что потенциальная энергия магнитного взаимодействия статора и ротора складывается из потенциалов каждого сердечника статора в указанном модельном периодическом поле ротора и может быть выражена суммой



При равном количестве магнитов и сердечников статор и ротор сильно взаимодействуют, «цепляются» друг за друга. Все комбинации  $\{N_s, N_r\}$  регулярно расположенных магнитов и сердечников, лежащие ниже главной диагонали ( $N_s > N_r$ ), обеспечивают пи-резонанс (табл. 1). Это возможно также в ряде случаев при  $N_s < N_r$ .

Исследуем потенциалы вида (2), образующие базис для аппроксимации некоторого класса функций (табл. 2). Серым цветом выделены ячейки  $\{N_s, N_r\}$ , соответствующие пи-резонансу, примыкающие к главной диагонали.

Таблица 2

Пи-резонансы системы статор – ротор для потенциала  $U(\gamma) = |\sin\gamma|^{1/2} \text{sign}(\sin\gamma)$

Pi-resonances for the stator – rotor system for potential  $U(\gamma) = |\sin\gamma|^{1/2} \text{sign}(\sin\gamma)$

$N_s$	$N_r$															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2	0	2	0	4	0	6	0	8	0	10	0	12	0	14	0	16
3	3	6	3	12	15	6	21	24	9	30	33	12	39	42	15	48
4	0	0	0	4	0	0	0	8	0	0	0	12	0	0	0	16
5	5	10	15	20	5	30	35	40	45	10	55	60	65	70	15	80
6	0	6	0	12	0	6	0	24	0	30	0	12	0	42	0	48
7	7	14	21	28	35	42	7	56	63	70	77	84	91	14	105	112
8	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	16
9	9	18	9	36	45	18	63	72	9	90	99	36	117	126	45	144
10	0	10	0	20	0	30	0	40	0	10	0	60	0	70	0	80
11	11	22	33	44	55	66	77	88	99	110	11	132	143	154	165	176
12	0	0	0	12	0	0	0	24	0	0	0	12	0	0	0	48
13	13	26	39	52	65	78	91	104	117	130	143	156	13	182	195	208
14	0	14	0	28	0	42	0	56	0	70	0	84	0	14	0	112
15	15	30	15	60	15	30	105	120	45	30	165	60	195	210	15	240
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16

Видно, что таблица пи-резонансов для этой функции существенно отличается от таковой для функции синуса. У (2) количество комбинаций  $\{N_s, N_r\}$ , обеспечивающих пи-резонанс, существенно меньше, чем у (1).

Весьма интересным фактом является то, что таблица пи-резонансов не изменяется для всего класса модельных функций (2) независимо от  $n$ , в чем легко убедиться путем непосредственного расчета.

Таблица пи-резонансов для потенциала  $U(\gamma) = |\sin\gamma|^2 \text{sign}(\sin\gamma)$  совпадает с таблицей для модельных функций (2), поэтому отдельно не приводится. При этом для функций вида (3) амплитуда энергии взаимодействия для нечетных значений  $N_s$  на порядок меньше. Таблицы для (3) с четными значениями  $n > 2$  идентичны.

Для потенциалов вида (4) (зауженная вершина, расширенное дно) данные численного расчета представлены в табл. 3, 4.



Таблица пи-резонансов для потенциала  $U(\gamma) = \sin^2(\gamma/2)$  полностью совпадает (по крайней мере, в рассмотренном диапазоне значений  $N_r, N_s$ ) с табл. 1, поэтому отдельно не приводится.

С повышением степени при синусе потенциалов  $U(\gamma) = [\sin(\gamma/2)]^{2n}$ , уменьшается количество случаев, обеспечивающих пи-резонанс. Экстраполируя данный результат, можем заключить, что при дальнейшем увеличении степени при синусе точки, обеспечивающие пи-резонанс, будут сосредотачиваться вблизи главной диагонали.

**Общие точки пи-резонанса**

Построим таблицу пи-резонансов, общих для всех рассмотренных случаев (табл. 5). Для упрощения восприятия цифрами обозначены только ячейки, соответствующие пи-резонансу, и главная диагональ. Прочие ячейки оставлены пустыми и затемнены.

Таблица 5

**Общие пи-резонансы для потенциалов (1)–(4)  
Common pi-resonances for potentials (1)–(4)**

$N_s$	$N_r$															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1															
2		2														
3			3													
4	0		0	4	0		0		0		0		0		0	
5					5											
6	0				0	6	0				0		0			
7							7									
8	0	0	0		0	0	0	8	0	0	0		0	0	0	
9									9							
10	0		0				0		0	10	0		0			
11											11					
12	0	0	0		0		0		0	0	0	12	0	0	0	
13													13			
14	0		0		0				0		0		0	14	0	
15															15	
16	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	16

Учитывая проведенный анализ, можно заключить, что для реальной конструкции генератора наиболее благоприятная комбинация  $\{N_s, N_r\}$  соответствует точкам пи-резонанса, общим для модельных потенциалов взаимодействия (табл. 5).

**Взаимодействие ротора с двумя статорами.** В случае если в системе имеются два статора, расположенных выше и ниже ротора, характер взаи-

модействия с каждым из них по отдельности остается тем же. В силу аддитивности и независимости потенциалов взаимодействия с каждым статором пи-резонанс не зависит от взаимного углового расположения статоров.

Однако если оба статора располагаются симметрично и образуют периодическую структуру с двойной частотой (при условии, что количество ферритовых сердечников одинаково на обоих статорах), то два статора взаимодействуют как единая система с удвоенным количеством ферритов. Например, для синусоидального потенциала при  $N_r = 9$ ,  $N_{s1} = 3$ ,  $N_{s2} = 3$  (индексы 1, 2 соответствуют верхнему и нижнему статорам) система закономерно дает синусоидальный потенциал с девятью максимумами, поскольку ротор взаимодействует независимо с обоими статорами. Но если сдвиг угла расположения обоих статоров составит  $\beta = 60^\circ$ , произойдет полная компенсация магнитного трения (табл. 6).

Таблица 6

**Приближение к пи-резонансу при относительном повороте  
нижнего и верхнего статоров**

**Approach to pi-resonance at rotation of the lower stator relatively to the upper one**

Угол взаимного расположения статоров $\beta$ , град.	30	40	50	55	56	57	58	59	59,5	59,8	59,9	59,99
Энергия взаимодействия статора и ротора $E(\gamma)$	4,10	6,00	4,20	2,30	2,00	1,50	1,00	0,50	0,25	0,10	0,05	0,005

Таким образом, имеет место линейное приближение (по отклонению угла) к полной компенсации магнитного взаимодействия. Интересно, что пи-резонанс в рассмотренном случае реализуется не только при симметричном равноудаленном расположении статоров, но и при угле взаимного расположения  $\beta = 20^\circ$ , что свидетельствует о скрытой симметрии в системе. При этом идентичность взаимодействия ротора с нижним и верхним статорами технически труднодостижима ввиду вероятной асимметрии верх – низ в системе, связанной с конструкцией генератора, различием зазоров и прочими причинами.

***Влияние погрешности расположения ферритовых сердечников.***

Важное теоретическое и практическое значение имеет влияние геометрической неточности размещения катушек, сердечника и магнитов на пи-резонанс. Действительно, механическая обработка деталей генератора, изготовление катушек и последующее их крепление не могут производиться идеально точно. Соответствующие эффекты необходимо оценивать при выборе технологии изготовления деталей.

Смоделируем эффект геометрической погрешности расположения ферромагнитных сердечников внесением случайной погрешности с заданной амплитудой в угол расположения сердечника. Для этого модифицируем формулу (5):

$$E(\gamma) = \sum_{n=1}^{N_s} U \left[ \frac{2\pi N_r}{360} \left( \frac{360}{N_s} n + \gamma + RND(x) \right) \right], \quad (6)$$

где  $RND(x)$  – случайная величина в пределах  $(0, x)$  угловых градусов, имитирующая отклонение расположения сердечника на величину  $\pm x/2$ .

Расчет показывает, что при внесении возмущения пи-резонанс нарушается,  $E(\gamma)$  перестает быть константой и принимает характер несимметричной квазипериодической функции. Количественно оценить отклонение полученной функции от константы можно рассчитав ее амплитуду:

$$\text{Amp}(E) = \max(E(\gamma)) - \min(E(\gamma)). \quad (7)$$

Для каждого значения  $x$  генерировался набор погрешностей  $RND(x)$ , используемый для последующих расчетов результирующего потенциала взаимодействия  $E(\gamma)$  и  $\text{Amp}(E)$ . Ниже представлены зависимости  $\text{Amp}(E)$  от величины погрешности расположения сердечников  $x$  для разных пар  $\{N_s, N_r\}$  и фиксированного модельного потенциала  $U(\gamma) = |\sin \gamma|^{1/2} \times \text{sign}(\sin \gamma)$  (рис. 3), а также для фиксированной пары  $\{N_s, N_r\}$  и различных модельных потенциалов (рис. 4).

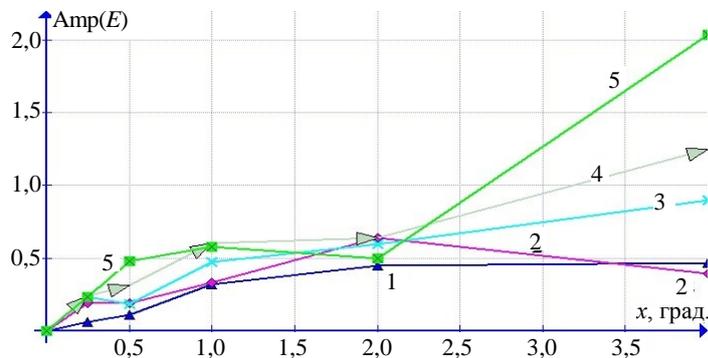


Рис. 3. Зависимость амплитуды потенциала взаимодействия статора и ротора от погрешности расположения сердечника катушки индуктивности

для  $U(\gamma) = |\sin \gamma|^{1/2} \text{sign}(\sin \gamma)$ :

1 –  $\{N_s, N_r\} = \{4, 5\}$ ; 2 –  $\{6, 7\}$ ; 3 –  $\{8, 9\}$ ; 4 –  $\{10, 11\}$ ; 5 –  $\{12, 13\}$

Fig. 3. Dependence of the amplitude of the interaction potential of the stator and rotor on angular inaccuracy of location of the inductor core

for  $U(\gamma) = |\sin \gamma|^{1/2} \text{sign}(\sin \gamma)$ :

1 –  $\{N_s, N_r\} = \{4, 5\}$ ; 2 –  $\{6, 7\}$ ; 3 –  $\{8, 9\}$ ; 4 –  $\{10, 11\}$ ; 5 –  $\{12, 13\}$

Как видим, представленные зависимости имеют отчасти нерегулярный характер, что объясняется случайностью внесенных погрешностей. Картина осцилляций момента сцепления может быть бесконечно разнообразной в зависимости от конкретных погрешностей расположения сердечников,

магнитов и их количества. От случайного набора поправок в (6) зависит и амплитуда результирующей функции взаимодействия.

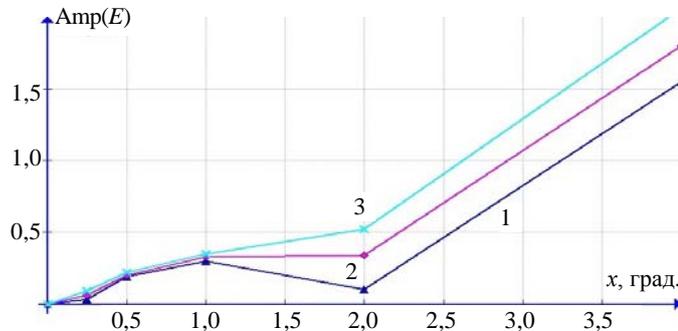


Рис. 4. Зависимость амплитуды потенциала взаимодействия статора и ротора от погрешности расположения сердечника катушки индуктивности при  $\{N_s, N_r\} = \{12, 13\}$ :

$$1 - U(\gamma) = \sin^2(\gamma/2); 2 - U(\gamma) = \sin^4(\gamma/2); 3 - U(\gamma) = \sin^6(\gamma/2)$$

Fig. 4. Dependence of the amplitude of the interaction potential of the stator and rotor on angular inaccuracy of location of the inductor core for  $\{N_s, N_r\} = \{12, 13\}$ :

$$1 - U(\gamma) = \sin^2(\gamma/2); 2 - U(\gamma) = \sin^4(\gamma/2); 3 - U(\gamma) = \sin^6(\gamma/2)$$

На рис. 5 представлены два случайных варианта функции суммарного потенциала (демонстрировать большее количество не целесообразно). Следует отметить общую закономерность соответствующих потенциалов – наличие элемента упорядоченности – периодичности с количеством периодов, равным числу магнитов ротора (рис. 5), и быструю отстройку системы от пи-резонанса (рис. 3, 4). В целом можно констатировать, что при характерной погрешности расположения сердечников в 1 угловой градус амплитуда осцилляций составляет порядка  $\frac{1}{2}$  величины энергии взаимодействия пары магнит – сердечник.

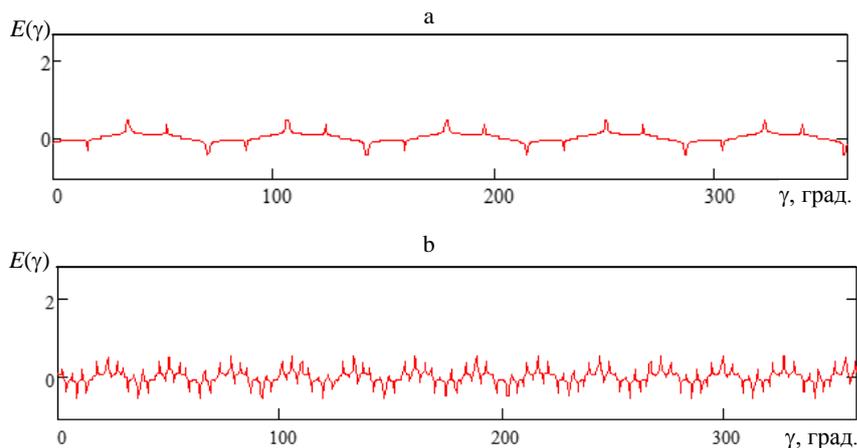


Рис. 5. Варианты потенциала взаимодействия статор – ротор (6) при:  
а –  $x = 2^\circ$ ,  $\{N_s, N_r\} = \{4, 5\}$ ; б –  $x = 1^\circ$ ,  $\{N_s, N_r\} = \{12, 13\}$

Fig. 5. Variants of the potentials of stator – rotor interaction (6) when:  
а –  $x = 2^\circ$ ,  $\{N_s, N_r\} = \{4, 5\}$ ; б –  $x = 1^\circ$ ,  $\{N_s, N_r\} = \{12, 13\}$

**Нарушение пи-резонанса при потере симметрии потенциала взаимодействия.** Исследование вопроса о том, какими свойствами должен обладать потенциал взаимодействия для обеспечения пи-резонанса в общем случае, выходит за рамки данной статьи. Однако можно утверждать, что он должен быть периодическим в цикле (иметь осевую симметрию  $N_r$ -го порядка), а также зеркально симметричным относительно максимума (минимума) на одном периоде. Проиллюстрируем последнее утверждение. Возьмем в качестве функции, нарушающей зеркальную симметрию потенциалов на одном периоде, пилообразную кривую  $Pila(\gamma)$  с длиной «зуба», равной половине периода  $U(\gamma)$ , и амплитудой  $d$  и модифицируем (5)

$$E(\gamma) = \sum_{n=1}^{N_s} \left\{ U \left[ \frac{2\pi N_r}{360} \left( \frac{360}{N_s} n + \gamma \right) \right] + d Pila \left[ \frac{\pi N_r}{360} \left( \frac{360}{N_s} n + \gamma \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

Построим величину амплитуды энергии взаимодействия статора и ротора в случае нарушения симметрии как функцию от параметра  $d$ , согласно (8), для  $U(\gamma) = |\sin \gamma|^{1/2} \text{sign}(\sin \gamma)$  (рис. 6).

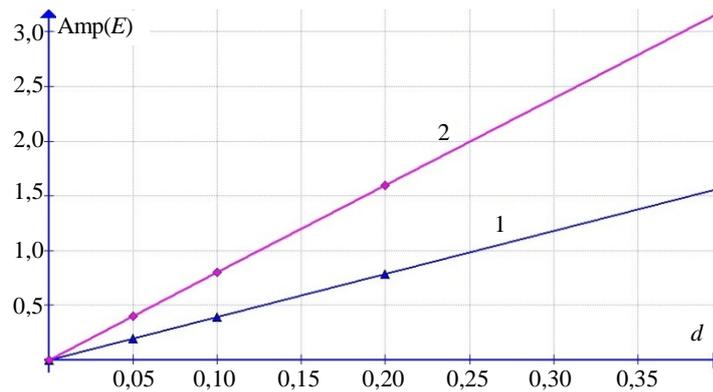


Рис. 6. Амплитуда потенциала взаимодействия статора и ротора при нарушении симметрии согласно (8): 1 –  $\{N_s, N_r\} = \{4, 5\}$ ; 2 –  $\{12, 14\}$

Fig. 6. The amplitude of the interaction potential of the stator and rotor in case of symmetry breaking according to (8): 1 –  $\{N_s, N_r\} = \{4, 5\}$ ; 2 –  $\{12, 14\}$

Как видим, энергия взаимодействия линейно возрастает от нулевого значения, что вполне очевидно, учитывая (8). Эффект усиливается с увеличением количества магнитов ротора. При относительной амплитуде возмущающей добавки  $d \sim 0,1$  энергия взаимодействия статор – ротор близка к энергии взаимодействия отдельной пары магнит – сердечник.

## ВЫВОДЫ

1. Методом численного анализа исследованы качественные закономерности коллективного взаимодействия постоянных магнитов ротора и ферромагнитных сердечников (катушек) статора генератора. В рамках обозна-

ченного класса модельных периодических потенциалов взаимодействия постоянных магнитов и катушек показано, что характер силового взаимодействия определяется числом сердечников и магнитов  $\{N_s, N_r\}$  и может иметь вид периодической функции различной амплитуды либо обращаться в нуль. Эффект исчезновения (радикального уменьшения) магнитного сцепления при определенной конфигурации магнитно-механической системы статор – ротор назван пи-резонансом, что подчеркивает циклический характер потенциалов взаимодействия постоянных магнитов и катушек и определенную аналогию с волновыми резонансными явлениями. Построены таблицы для различных классов потенциалов, которые могут служить основой для принятия конструкторских решений при создании генераторов.

2. Показано, что случайное отклонение положений сердечников от геометрически точной позиции быстро разрушает пи-резонанс. При погрешности в угловом положении порядка  $1^\circ$  амплитуда энергии сцепления статора – ротора может быть близкой к энергии взаимодействия отдельной пары магнит – сердечник. К аналогичному по масштабу результату приводит нарушение симметрии потенциала, соответствующее добавлению пилообразной функции амплитудой 10 % от амплитуды симметричного периодического потенциала.

3. В системе, включающей два статора, расположенных по обе стороны от ротора, возможно возникновение скрытой симметрии, проявляющейся в пи-резонансе при сдвиге статоров друг относительно друга на угол  $180/N_r$ .

4. Реализованный в работе метод численного исследования электромеханической системы нагляден и позволяет анализировать не только вопрос уменьшения паразитных моментов при трогании генератора и его вращении без нагрузки, но и (при некотором обобщении) динамику взаимодействия статора и ротора при работе под нагрузкой.

5. Некоторые результаты исследования представляются нетривиальными, например факт реализации пи-резонанса для широкого класса периодических потенциалов. В связи с этим представляет интерес определение общих свойств потенциалов взаимодействия, необходимых и достаточных для возникновения пи-резонанса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко, М. П. Электрические машины: в 2 ч. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. М.: Энергия. 1973. Ч. 2. 648 с.
2. Ghasemi, A. Cogging Torque Reduction and Optimization in Surface-mounted Permanent Magnet Motor Using Magnet Segmentation Method / A. Ghasemi // Electric Power Components and Systems. 2014. Vol. 42, Iss. 12. P. 1239–1248. <https://doi.org/10.1080/15325008.2014.893548>.

3. Keyhani, A. Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines / A. Keyhani [et al.] // *Electric Machines & Power Systems*. 1999. Vol. 27, Iss. 7. P. 665–678. <https://doi.org/10.1080/073135699268939>.
4. Macek-Kamińska, Kr. The Use of Modern Tools in Simulation of Electromechanical Systems / Kr. Macek-Kamińska, M. Kamiński // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2009. Vol. 3. P. 92–95.
5. Platt, D. Torque Calculation of Machines with Permanent Magnet Materials / D. Platt, S. Geetha // *Electric Machines & Power Systems*. 1996. Vol. 24, Iss. 4. P. 393–415. <https://doi.org/10.1080/07313569608955682>.
6. Фираго, Б. И. Исследование переходных процессов электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами при линейном изменении частоты питающего напряжения / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. Т. 63, № 3. С. 197–211. <https://doi.org/10.21122/1029-448-2020-63-3-197-211>.
7. Магнитоэлектрический генератор: пат. WO2014074009A1 / С. М. Есаков, М. С. Есаков, А. Ю. Велико-Иваненко. Опубл. 15.05.2014.
8. Motor/Generator to Reduce Cogging Torque: Patent US7595575B2 / Yu. Kaneko, H. Nakayama. Publ. date 29.09.2009.
9. Two-Phase Permanent-Magnet Electric Rotating Machine: Patent US6172438B1 / Masafumi Sakamoto. Publ. date 09.01.2001.

Поступила 03.09.2021    Подписана в печать 09.11.2021    Опубликована онлайн 31.01.2022

#### REFERENCES

1. Kostenko M. P., Piotrovskii L. M. (1973) *Electrical Machinery. Part 2*. Moscow, Energiya Publ. 648 (in Russian).
2. Ghasemi A. (2014) Cogging Torque Reduction and Optimization in Surface-Mounted Permanent Magnet Motor Using Magnet Segmentation Method. *Electric Power Components and Systems*, 42 (12), 1239–1248. <https://doi.org/10.1080/15325008.2014.893548>.
3. Keyhani A., Studer C. B., Sebastian T., Murthy S. K. (1999) Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines. *Electric Machines & Power Systems*, 27 (7), 665–678. <https://doi.org/10.1080/073135699268939>.
4. Macek-Kamińska K., Kamiński M. (2009) The Use of Modern Tools in Simulation of Electromechanical Systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, (3), 92–95.
5. Platt D., Geetha S. (1996) Torque Calculation of Machines with Permanent Magnet Materials. *Electric Machines & Power Systems*, 24 (4), 393–415. <https://doi.org/10.1080/07313569608955682>.
6. Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2020) Investigation of Transients of the Electrical Drive with a Permanent Magnet Synchronous Motor under a Ramp of Supply Voltage Frequency. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 197–211. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-197-211> (in Russian).
7. Esakov S. M., Esakov M. S., Veliko-Ivanenko A. Y. (2014) *Magneto-Electrical Generator: Patent WO2014074009A1* (in Russian).
8. Kaneko Yu., Nakayama H. (2005) Motor/Generator to Reduce Cogging Torque: Patent US7595575B2.
9. Sakamoto M. (2001) *Two-phase Permanent-Magnet Electric Rotating Machine: Patent US6172438B1*.

Received: 3 September 2021    Accepted: 9 November 2021    Published online: 31 January 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51>

УДК 621.316

## **Электромагнитная совместимость компенсирующих устройств и преобразователей регулируемого электропривода в электрических сетях промышленных предприятий**

**В. П. Счастный<sup>1)</sup>, А. И. Жуковский<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>ЧУП «КРМ Инжиниринг» (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Проблемы компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных предприятий нераздельно связаны. Их актуальность обусловлена широким применением электроприемников, потребляющих реактивную мощность и искажающих качество электрической энергии в сети, а также внедрением в производство новых технологий, систем и оборудования, предъявляющих повышенные требования к качеству электрической энергии. Важной характеристикой качества электрической энергии, нормируемого ГОСТ 32144–2013, является несинусоидальность напряжения. Основная причина несинусоидальности напряжения в электрических сетях промышленных предприятий – применение электрооборудования с нелинейной вольт-амперной характеристикой, являющегося источником кондуктивных электромагнитных помех, в частности: регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока, источников бесперебойного питания электроприемников, электросварочного оборудования, дуговых электрических печей, установок индукционного нагрева, газоразрядных источников излучения. Вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик указанные выше устройства потребляют из сети несинусоидальный ток, что вызывает гармонические искажения питающего напряжения, включающего основную гармоническую составляющую и высшие гармонические составляющие, кратные основной частоте. Несинусоидальность напряжения, в свою очередь, вызывает дополнительные потери мощности и энергии в элементах электрической сети, приводит к перегреву и ускоренному старению изоляции электрооборудования, снижая его эксплуатационную надежность и уменьшая срок службы, ухудшает точность электрических измерений, вызывает нарушения в работе систем автоматики, телемеханики, релейной защиты, электронных систем и коммуникаций. Кроме того, она существенно усложняет компенсацию реактивной мощности в электрической сети. Компенсирующие устройства выполняются на базе конденсаторов, электрические параметры которых (сопротивление, мощность, ток) зависят как от величины питающего напряжения, так и от его гармонического состава. В настоящей статье обозначены проблемы и предложены решения в части компенсации реактивной мощности и повышения качества

---

### **Адрес для переписки**

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

### **Address for correspondence**

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

---

электрической энергии в электрических сетях, содержащих тиристорные преобразователи напряжения и преобразователи частоты, применяемые в установках регулируемого электропривода промышленных предприятий.

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, качество электрической энергии, кондуктивная электромагнитная помеха, преобразователь напряжения, преобразователь частоты, фильтрокомпенсирующее устройство

**Для цитирования:** Счастный, В. П. Электромагнитная совместимость компенсирующих устройств и преобразователей регулируемого электропривода в электрических сетях промышленных предприятий / В. П. Счастный, А. И. Жуковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 37–51. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51>

## Electromagnetic Compatibility of Compensating Devices and Converters of an Adjustable Electric Drive in Electrical Networks of Industrial Enterprises

V. P. Schasny<sup>1)</sup>, A. I. Zhukouski<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>PUE “KRM Engineering” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The problems of reactive power compensation and improving the quality of electrical energy in the power supply systems of industrial enterprises are inseparable. Their relevance is due to the widespread use of electric receivers that consume reactive power and distort the quality of electrical energy in the network, as well as the implementation of new technologies, systems and equipment into production that make increased demands on the quality of electrical energy consumed. An important characteristic of the quality of electrical energy rationed by GOST 32144–2013 is the non-sinusoidal voltage. The main reason for the non-sinusoidal voltage in the electrical networks of industrial enterprises is the use of electrical equipment with a nonlinear voltage characteristic, which is a source of conductive electromagnetic interference, in particular: adjustable DC and AC electric drives, uninterruptible power supplies of electric receivers, electric welding equipment, electric arc furnaces, induction heating installations, gas-discharge radiation sources. Due to the nonlinearity of the current-voltage characteristics, the above devices consume a non-sinusoidal current from the network, which causes harmonic distortion of the supply voltage, including the fundamental harmonic component and higher harmonic components that are multiples of the fundamental frequency. Non-sinusoidal voltage, in turn, causes additional losses of power and energy in the elements of the electrical network, causes overheating and accelerated aging of the insulation of electrical equipment, reducing its operational reliability and reducing service life, worsens the accuracy of electrical measurements, causes malfunctions in automation systems, telemechanics, relay protection, electronic systems and communications. Non-sinusoidal voltage significantly complicates the compensation of reactive power in the electrical network. Compensating devices are made on the basis of capacitors, whose electrical parameters (resistance, power, current) depend on both the magnitude of the supply voltage and its harmonic composition. The present article identifies problems and proposes solutions in terms of reactive power compensation and improving the quality of electrical energy in electrical networks containing thyristor voltage converters and frequency converters used in adjustable electric drive installations of industrial enterprises.

**Keywords:** reactive power compensation, quality of electrical energy, conductive electromagnetic interference, voltage converter, frequency converter, filter compensating device

**For citation:** Schasny V. P., Zhukouski A. I. (2022) Electromagnetic Compatibility of Compensating Devices and Converters of an Adjustable Electric Drive in Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 37–51. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51> (in Russian)

## **Введение**

Под электромагнитной совместимостью в электроэнергетике принято понимать способность различных видов электрооборудования нормально функционировать в единой электромагнитной среде, не создавая при этом взаимно недопустимых помех. Проблема электромагнитной совместимости электроприемников с питающей сетью вызывает объективные сложности при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий.

На промышленных предприятиях широко применяются регулируемые электроприводы постоянного и переменного тока (асинхронные). Коэффициент мощности указанных электроприемников преимущественно находится в пределах 0,60–0,85, соответственно коэффициент реактивной мощности 0,6–1,3. В этих условиях потребляемая бесполезная реактивная мощность соизмерима и даже может превышать полезную активную мощность, что обуславливает необходимость компенсации реактивной мощности.

В электрических сетях, содержащих преобразователи регулируемого электропривода, в частности тиристорные преобразователи напряжения и преобразователи частоты, компенсация реактивной мощности имеет особенности. Вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик указанные устройства потребляют из сети несинусоидальный ток, включающий ряд высших гармоник, которые создают кратные падения напряжения в элементах электрической сети и тем самым вызывают искажение синусоидальности питающего напряжения.

Особенно опасна несинусоидальность напряжения для конденсаторов. Из-за уменьшения сопротивления конденсаторов токам высших гармоник пропорционально порядковому номеру гармоники происходит их перегрузка по току и, как следствие, перегрев, ускоренное старение диэлектрика и преждевременный выход из строя. Согласно мировой статистике, более 70 % повреждений конденсаторов в электрических сетях промышленных предприятий происходит из-за воздействия высших гармоник.

## **Проблемы и их решения**

Регулируемые электроприводы постоянного тока содержат двигатели постоянного тока (ДПТ) и управляемые тиристорные выпрямители (УТВ). Искажения кривых тока и напряжения в сетях ДПТ с УТВ являются следствием коммутации тиристоров. В момент коммутации тиристоров происходит подключение нагрузки к соответствующей фазе без разрыва тока предыдущей фазы, что приводит к периодическим междуфазным коротким замыканиям в питающей сети. Эти коммутационные короткие замыкания отличаются от аварийных лишь малой длительностью времени протекания. В кривой напряжения в процессе коммутации тиристоров появляются коммутационные искажения, форма, величина и количество которых зави-

сят от схемы и количества фаз выпрямления, мощности преобразователя, параметров питающей сети.

Коммутационные искажения тока и напряжения имеют периодический характер, что позволяет производить их гармонический анализ – выделять высшие гармоники, кратные основной частоте.

Методы расчета несинусоидальности напряжения в электрических сетях при работе вентильных преобразователей описаны в [1]. Порядок высших гармоник тока, создаваемых УТВ, определяется по выражению

$$n = mk \pm 1, \quad (1)$$

где  $m$  – число фаз выпрямления;  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  – последовательный ряд натуральных чисел.

В регулируемых электроприводах постоянного тока наиболее часто применяются УТВ, выполненные по 6- или 12-пульсной схеме выпрямления. Согласно (1), входной ток 6-пульсного преобразователя содержит 5, 7, 11, 13, 17, 19-ю и т. д. гармоники; 12-пульсного – 11, 13, 23, 25, 35, 37-ю и т. д.

В качестве примера на рис. 1–4 представлены гистограммы коэффициентов высших гармонических составляющих тока  $K_{I(n)}$  и напряжения  $K_{U(n)}$  в сетях волочильных станов грубого (ГВ) и среднего (СВ) волочения сталепроволочного цеха № 1 Белорусского металлургического завода. Указанные станы оснащены ДПП с УТВ, выполненными по 6-пульсной схеме. Методика расчета параметров и результаты моделирования режимов работы компенсирующих устройств в электрических сетях волочильных станов с регулируемыми электроприводами постоянного тока подробно описаны в [2, 3].

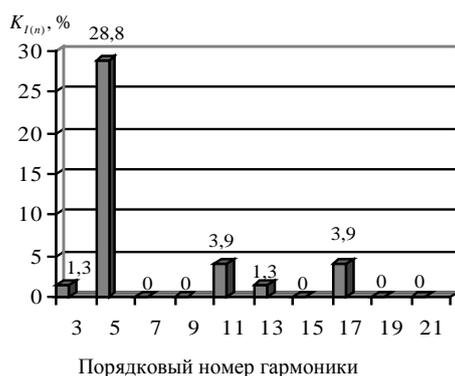


Рис. 1. Гистограмма коэффициентов высших гармонических составляющих тока стана грубого волочения

Fig. 1. Histogram of the coefficients of higher harmonic components of the current in the coarse drawing mill

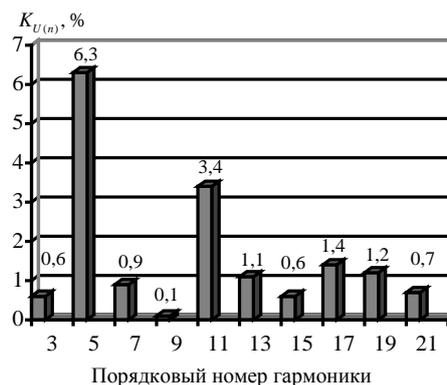


Рис. 2. Гистограмма коэффициентов высших гармонических составляющих напряжения в сети стана грубого волочения

Fig. 2. Histogram of the coefficients of the higher harmonic components of the voltage in the network of coarse drawing mill

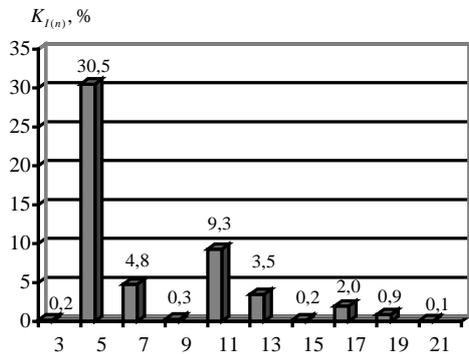


Рис. 3. Гистограмма коэффициентов высших гармонических составляющих тока стана среднего волочения

Fig. 3. Histogram of the coefficients of the higher harmonic components of the current in the medium drawing mill

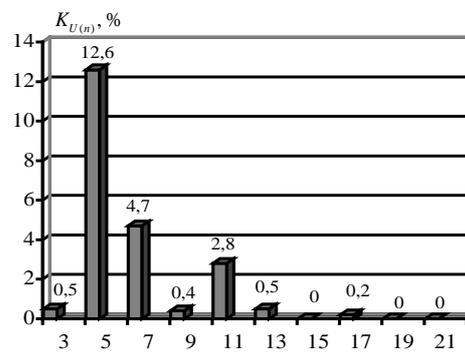


Рис. 4. Гистограмма коэффициентов высших гармонических составляющих напряжения в сети стана среднего волочения

Fig. 4. Histogram of the coefficients of the higher harmonic components of the voltage in the network of the medium drawing mill

Анализ несинусоидальности напряжения в сети стана СВ показал следующее:

- качество электрической энергии не удовлетворяет требованиям стандарта [4]: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения 13,7 % (допускается 8 %); коэффициент 5-й гармонической составляющей напряжения 12,6 % (допускается 6 %);

- в составе напряжения ярко выделяются 5, 7 и 11-я высшие гармонические составляющие, формирующие основные искажения синусоидальности напряжения.

При фактической величине напряжения и его гармоническом составе в сети стана СВ расчетный коэффициент перегрузки конденсаторов по току  $k_I > 1,4$ . Для конденсаторов стандартных серий производителями установлен коэффициент максимальной длительной токовой перегрузки  $k_{I_{\max}} = 1,3$ , что соответствует требованиям Правил устройства электроустановок. В указанных условиях компенсация реактивной мощности с применением обычных батарей статических конденсаторов или автоматических конденсаторных установок (АКУ) невозможна.

Задачи компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии в исследуемой сети могут быть решены в комплексе путем применения фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), представляющих собой комбинации пассивных  $L$ - $C$ -фильтров с последовательным соединением дросселей и конденсаторов, резонансно настроенных на частоты преобладающих высших гармоник. Достоинство ФКУ состоит в том, что конденсаторы, входящие в состав фильтров высших гармоник, являются источниками реактивной мощности на основной частоте и, таким

образом, осуществляют компенсацию реактивной мощности в электрической сети.

Принцип действия ФКУ основан на условии резонанса в электрической цепи с последовательным соединением индуктивного и емкостного элементов

$$n2\pi fL_{\Phi} = \frac{1}{n2\pi fC_{\Phi}}, \quad (2)$$

где  $f$  – частота сети, Гц;  $L_{\Phi}$  – индуктивность фильтра, Г;  $C_{\Phi}$  – емкость фильтра, Ф.

При идеальной резонансной настройке фильтра  $L$ – $C$ -цепь представляет собой короткое замыкание для  $n$ -й гармоники тока, в результате напряжение в сети не содержит данной гармоники. Вместе с тем, кроме тока  $n$ -й гармоники, по  $L$ – $C$ -цепи (при пренебрежении активным сопротивлением элементов) протекает ток 1-й гармоники

$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{1}{2\pi fC_{\Phi}} - 2\pi fL_{\Phi}}, \quad (3)$$

где  $U_1$  – напряжение 1-й гармоники, В.

Трехфазный фильтр, настроенный на частоту  $n$ -й гармоники, выдает в сеть реактивную мощность

$$Q = 3(2\pi fC_{\Phi}) \frac{n^2}{n^2 - 1} U_1^2. \quad (4)$$

Для компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник в сети стана СВ целесообразно применить автоматическое фильтрокомпенсирующее устройство (АФКУ). Параметры компенсирующих ступеней АФКУ (емкость конденсаторов, индуктивность дросселей) выбираются такими, чтобы коэффициент мощности в сети был не ниже 0,95 и обеспечивалась резонансная настройка  $L$ – $C$ -цепей на частоты фильтруемых гармоник: для фильтра 5-й гармоники резонансная частота фильтра принята 247 Гц (идеальная резонансная частота 250 Гц), для фильтра 7-й гармоники – 346 Гц (350 Гц). При наличии в АФКУ фильтров двух и более гармоник для управления режимом работы необходимо использовать специальный регулятор реактивной мощности с функцией избирательного включения ступеней регулирования, реализующий алгоритм последовательного включения фильтров более низких, а затем более высоких гармоник и их отключения в обратном порядке.

Результаты моделирования работы АФКУ в сети стана СВ приведены в табл. 1, 2. Формы кривых тока и напряжения в сети стана СВ в исходном режиме и при включении в сеть АФКУ представлены на рис. 5–8.

Таблица 1

**Значения токов основной и высших гармоник стана среднего волочения**  
**The values of the currents of the fundamental and higher harmonics**  
**of the medium drawing mill**

Составляющая тока	Значение тока основной и высших гармоник				Кратность изменения тока
	без автоматического фильтрокомпенсирующего устройства		с автоматическим фильтрокомпенсирующим устройством		
	в амперах	в процентах от $I_1$	в амперах	в процентах от $I_1$	
$I_1$	338,5	–	148,8	–	2,3
$I_5$	94,6	28,0	2,63	1,8	36,0
$I_7$	16,9	5,0	0,46	0,3	36,7
$I_\Sigma$	353,6		149,0		2,4

Таблица 2

**Значения напряжений основной и высших гармоник в сети стана среднего волочения**  
**The values of the voltages of the fundamental and higher harmonics in the network**  
**of the medium drawing mill**

Составляющая напряжения	Значение напряжения основной и высших гармоник				Кратность изменения напряжения
	без автоматического фильтрокомпенсирующего устройства		с автоматическим фильтрокомпенсирующим устройством		
	в вольтах	в процентах от $U_1$	в вольтах	в процентах от $U_1$	
$U_1$	224,8	–	224,7	–	1,0
$U_5$	28,8	12,8	0,88	0,4	32,7
$U_7$	6,8	3,0	0,24	0,1	28,3
$U_\Sigma$	231,5		245,9		1,06

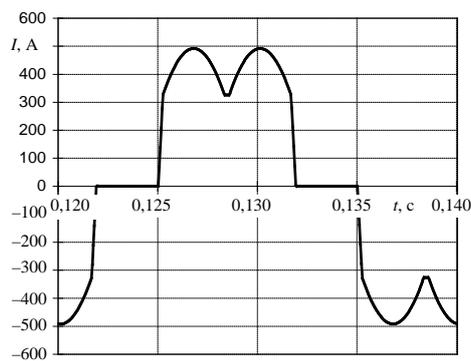


Рис. 5. Исходная форма кривой тока стана среднего волочения

Fig. 5. The initial shape of the current curve of the medium drawing mill

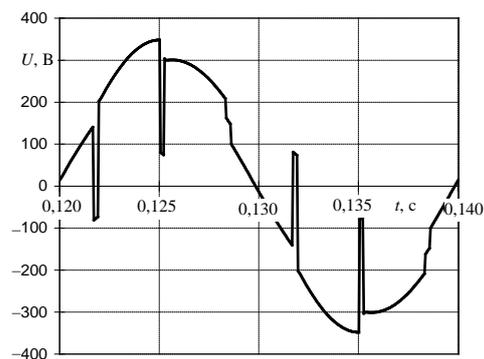


Рис. 6. Исходная форма кривой напряжения в сети стана среднего волочения

Fig. 6. The initial shape of the voltage curve in the network of the medium drawing mill

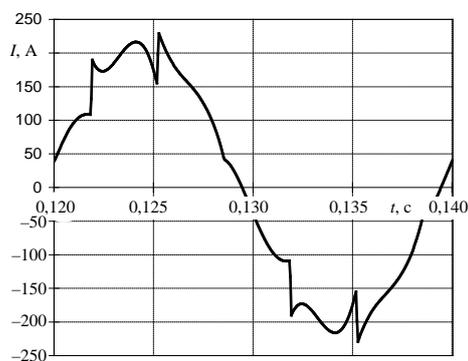


Рис. 7. Форма кривой тока стана среднего волочения с автоматическим фильтрокомпенсирующим устройством

Fig. 7. The shape of the current curve in the medium drawing mill with an automatic filter compensating device

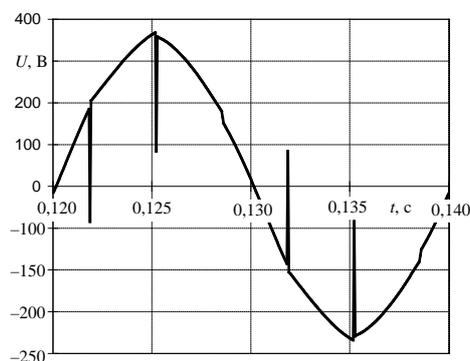


Рис. 8. Форма кривой напряжения в сети стана среднего волочения с автоматическим фильтрокомпенсирующим устройством

Fig. 8. The shape of the voltage curve in the network of the medium drawing mill with an automatic filter compensating device

Результаты расчетов показали, что включение в сеть стана СВ АФКУ, содержащего фильтры 5-й и 7-й гармоник, позволит:

- снизить уровни фильтруемых гармоник тока: 5-й – в 36 раз, 7-й – в 36,7 раза; гармоник напряжения: 5-й – в 32,7 раза, 7-й – в 28,3 раза;
- существенно улучшить формы кривых тока и напряжения;
- обеспечить соответствие значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициентов  $n$ -х гармонических составляющих напряжения требованиям действующего стандарта;
- уменьшить полный потребляемый ток стана за счет компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник в 2,4 раза, что даст возможность сократить потери мощности и энергии в сети.

При проектировании ФКУ часто сознательно снижают резонансную частоту  $L$ - $C$ -фильтров в отношении их идеальной резонансной частоты, что несколько уменьшает степень фильтрации высших гармоник, однако существенно повышает надежность ФКУ. К примеру, для фильтра 5-й гармоники резонансную частоту принимают равной 234 Гц, для 7-й гармоники – 331 Гц. Выбор резонансной частоты фильтров зависит от уровней гармонических искажений напряжения в сети и требований к степени фильтрации высших гармоник. Примеры применения ФКУ в электрических сетях промышленных предприятий описаны в [5–8].

Проблема электромагнитной совместимости также остро стоит при проектировании компенсации реактивной мощности в сетях с частотно-регулируемыми электроприводами, наиболее часто применяемыми в настоящее время. Частотно-регулируемые электроприводы содержат асинхронные электродвигатели (АД) и преобразователи частоты (ПЧ). Искажения кривых тока и напряжения в сетях АД с ПЧ обусловлены наличием выпрямителей на входе ПЧ.

Распространенное среди энергетиков мнение, что ПЧ, оснащенные встроенным входным фильтром (сетевым дросселем), не оказывают влияния на качество напряжения в питающей сети, не верно. Это мнение справедливо лишь для частного случая, когда в сети предприятия имеются единичные либо множество маломощных АД с ПЧ, которые не формируют максимальную нагрузку, и вносимые ими искажения не могут существенно повлиять на синусоидальность напряжения в сети. Работа ПЧ сопровождается потреблением из сети несинусоидального тока даже в том случае, когда индуктивность сетевого дросселя подобрана правильно. Как показывает практика, последнее наблюдается далеко не всегда, поскольку при внедрении частотно-регулируемого электропривода анализ сети – скорее исключение, чем правило. На рис. 9 приведены гистограммы высших гармоник напряжения в сети насосного агрегата повысительной насосной станции УП «Минскводоканал», оснащенного АД мощностью 200 кВт в комплекте с ПЧ, при работе с отключенным и включенным сетевым дросселем. Как видно из гистограмм, наличие сетевого дросселя на входе ПЧ незначительно уменьшает уровни высших гармоник напряжения в сети.



Рис. 9. Гистограммы высших гармоник напряжения в сети насосного агрегата (асинхронный двигатель с преобразователем частоты):  
а – без сетевого дросселя; б – с сетевым дросселем

Fig. 9. Histograms of higher voltage harmonics in the pumping unit network (induction motor with frequency converter):  
a – without mains choke; b – with mains choke

Компенсация реактивной мощности в сети АД с ПЧ имеет два принципиальных отличия от описанного выше решения для сети ДПТ с УТВ:

- 1) спектр высших гармоник напряжения в сети, как правило, более широкий, и отдельные высшие гармоники выделяются не так явно;
- 2) несинусоидальность напряжения в сети чаще всего соответствует норме, и проблема фильтрации высших гармоник остро не стоит.

В этих условиях применять ФКУ, содержащие фильтры сразу нескольких высших гармоник, технически сложно и экономически неэффективно.

Для компенсации реактивной мощности в сетях АД с ПЧ целесообразно применять АКУ в исполнении, защищенном от высших гармоник, с расстроенными  $L$ - $C$ -цепями (защищенные АКУ). Такие установки также называют широкополосными фильтрами высших гармоник. В них последовательно с конденсаторами включаются защитные дроссели, сдвигающие частоту резонанса системы ниже частоты самой низкой высшей гармоники, присутствующей в сети. Резонансная частота системы, включающей индуктивность элементов внешней сети (силового трансформатора и пр.) и емкость конденсатора, определяется:

– без защитного дросселя

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C}}; \quad (5)$$

– с защитным дросселем

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_c + L_d)C}}, \quad (6)$$

где  $L_c$  – индуктивность элементов внешней сети, Г;  $L_d$  – то же дросселя, Г;  $C$  – емкость конденсатора (батареи конденсаторов), Ф.

Коэффициент расстройки дросселя определяется как

$$k_p = \left( \frac{f}{f_d} \right)^2 100, \quad (7)$$

где  $f_d$  – резонансная частота дросселя, Гц.

В защищенных АКУ чаще всего применяются расстроенные дроссели на резонансные частоты 134 Гц ( $k_p = 14\%$ ) и 189 Гц ( $k_p = 7\%$ ). Соответственно дроссели с  $k_p = 14\%$  применяются в сетях с преобладанием 3-й гармоники и гармоник более высоких порядков, дроссели с  $k_p = 7\%$  – 5-й гармоники и гармоник более высоких порядков. Сопротивление  $L$ - $C$ -цепи на основной частоте и частотах меньше резонансной имеет емкостный характер, а на частотах больше резонансной – индуктивный, что препятствует возникновению высших гармоник тока значительной величины и не искажает синусоидальность напряжения в сети.

Производители компенсирующих устройств рекомендуют применять защищенные АКУ в сетях, где суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U > 3\%$  и отсутствуют требования к фильтрации высших гармоник. Однако данная рекомендация весьма условна, так как важно учитывать не только суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, но и значения коэффициентов  $n$ -х гармонических составляющих напряжения вследствие неравноценного влияния высших гармоник различных порядков на перегрузку конденсаторов.

Решение о применении обычных или защищенных АКУ необходимо принимать на основе анализа показателей несинусоидальности напряжения в сети и определения расчетной перегрузки конденсаторов. Критерием допустимости применения обычных АКУ является расчетное значение коэффициента длительной токовой перегрузки конденсаторов ( $k_I \leq 1,3$ ), определяемого с учетом тока основной частоты ( $I_1$ ) и токов высших гармонических составляющих ( $I_n$ ):

$$I_1 = \frac{U_1}{1/2\pi f C}; \quad (8)$$

$$I_n = \frac{U_n}{1/n 2\pi f C}; \quad (9)$$

$$I_\Sigma = \sqrt{I_1^2 + \sum I_n^2}; \quad (10)$$

$$k_I = \frac{I_\Sigma}{I_n}; \quad (11)$$

где  $U_n$  – напряжение  $n$ -й гармоники, В;  $I_{ном}$  – номинальный ток конденсатора (батареи конденсаторов), А.

Проблему надежности АКУ нельзя решить исключительно применением специальных конденсаторов, предназначенных для тяжелых (серия HD) и сверхтяжелых (серия UHD) условий работы. Конденсаторы указанных серий допускают ограниченные по времени токовые перегрузки (в течение не более 48 ч непрерывной работы):  $k_I \leq 2,0$  – для HD;  $k_I \leq 2,5$  – для UHD. Допускаемые длительные (без ограничения по времени) токовые перегрузки конденсаторов практически всех производителей  $k_I \leq 1,3$ . Поэтому специальные конденсаторы позволяют обеспечить достаточную надежность АКУ лишь в нормальных условиях и в условиях периодических недлительных перегрузок.

При проектировании компенсирующих устройств в сетях с гармонически искаженным напряжением необходимо учитывать, что включение в сеть конденсаторов с высокой вероятностью вызовет резонанс токов на частотах

ряда высших гармоник и приведет к еще большим гармоническим искажениям напряжения. В табл. 3 приведены показатели несинусоидальности напряжения на шинах низшего напряжения двухтрансформаторной ТП 10/0,4 кВ сильвинитовой обогатительной фабрики третьего рудоуправления ОАО «Беларуськалий» при отключенных и включенных АКУ. При включении в работу АКУ увеличиваются значения коэффициентов практически всех высших гармонических составляющих напряжения; особенно значительно увеличение коэффициентов 5, 7 и 11-й гармоник, которые и изначально были максимальными.

Таблица 3

**Показатели несинусоидальности напряжения на шинах низшего напряжения ТП 10/0,4 кВ при отключенных и включенных автоматических конденсаторных установках**  
**Indicators of non-sinusoidal voltage on low-voltage TP 10/0.4 kV buses when the automatic capacity units are switched off and on**

Показатель несинусоидальности напряжения	Трансформатор Т1		Трансформатор Т2	
	АКУ отключена	АКУ включена	АКУ отключена	АКУ включена
$K_U, \%$	2,5	3,9	2,9	5,0
Коэффициенты $n$ -х гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}, \%$				
$K_{U(3)}$	0,27	0,32	0,25	0,24
$K_{U(5)}$	2,36	3,32	2,53	3,78
$K_{U(7)}$	0,50	0,78	1,22	3,53
$K_{U(9)}$	0,15	0,52	0,09	0,27
$K_{U(11)}$	0,60	2,53	0,29	1,40
$K_{U(13)}$	0,10	0,60	0,18	0,73
$K_{U(15)}$	0,05	0,22	0,01	0,07
$K_{U(17)}$	0,07	0,30	0,03	0,20
$K_{U(19)}$	0,06	0,16	0,04	0,11
$K_{U(21)}$	0,03	0,10	0,01	0,01

Если при выборе типа АКУ ориентироваться исключительно на текущие значения показателей несинусоидальности напряжения в сети (как правило, именно эти данные являются исходными), можно допустить ошибку, приняв к установке АКУ без защиты от высших гармоник. Как следствие, при включении в сеть данная АКУ нормально работать не будет. На ряде предприятий новые АКУ, закупленные без достаточной технической проработки, не введены в эксплуатацию по причине их электромагнитной несовместимости с питающей сетью. Попытки эксплуатировать АКУ в нарушение требований электромагнитной совместимости часто приводят к их выходу из строя, иногда – к возникновению аварий, распространяющихся на всю систему электроснабжения предприятия.

Случаи аварийного выхода из строя конденсаторных установок энергослужбами предприятий не афишируются, но они далеко не единичны.

Защищенные АКУ и АФКУ в среднем в 2–2,5 раза дороже обычных конденсаторных установок, что сдерживает их масштабное применение. При детальной технико-экономической проработке применение специальных компенсирующих устройств позволяет достичь хороших результатов. Дополнительный экономический эффект от фильтрации высших гармоник может составить 20 % и более от общего эффекта (без учета технологического эффекта от повышения качества электрической энергии в сети, который зачастую является определяющим). Экономическая эффективность применения компенсирующих устройств в электрических сетях предприятий разных отраслей промышленности Беларуси (металлургии, машиностроения, строительной индустрии, пищевой промышленности) отражена в [9–12].

В заключение обратим внимание на еще одну важную проблему. Отсутствие в Беларуси платы за реактивную энергию (принимаемую и выдаваемую), а также реальной взаимной ответственности энергоснабжающих организаций и потребителей за нарушение установленных норм качества электрической энергии в точках ее передачи является серьезным препятствием для успешного решения задач компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии [13, 14]. Без соответствующих актов законодательства, регулирующих взаимоотношения и устанавливающих юридическую и экономическую ответственность субъектов рынка электроэнергии, при решении указанных задач неизбежны объективные технические сложности и недостижимы желаемые экономические результаты.

## **ВЫВОД**

При проектировании компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий ключевым фактором является обеспечение электромагнитной совместимости компенсирующих устройств и электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой, являющихся источниками кондуктивных электромагнитных помех. Задачи компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии должны решаться совместно на стадии проектирования систем электроснабжения предприятий. Выбор типов и параметров компенсирующих устройств необходимо производить на основе результатов исследования специфики электрических нагрузок и анализа (прогнозирования) показателей качества электрической энергии, выявления источников электромагнитных помех и оценки их влияния на работу компенсирующих устройств, моделирования режимов работы компенсирующих устройств в условиях существующей электромагнитной среды, определения экономической эффективности вариантов технических решений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество электрической энергии систем электропитания промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
2. Жуковский, А. И. Эффективность применения фильтрокомпенсирующих устройств на примере сталепроволочного цеха № 1 РУП «Белорусский металлургический завод» / А. И. Жуковский // *Металлургия и литейное производство* 2007. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сент. 2007. Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. С. 99–101.
3. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // *Энергия и Менеджмент*. 2008. № 3. С. 38–42.
4. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. 01.04.2016. Минск: БелГИСС, 2016. 19 с.*
5. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // *МЕТАЛЛ Информ*. 2008. № 4. С. 39–42.
6. Жуковский, А. И. Фильтрокомпенсирующие устройства для компенсации реактивной мощности и повышения качества электроэнергии в электрических сетях металлургических предприятий / А. И. Жуковский // *Металлургия и литейное производство* 2007. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сент. 2007. Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. С. 118–120.
7. Жуковский, А. И. К вопросу о проектировании компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // *Энергия и Менеджмент*. 2015. № 2. С. 20–30.
8. Счастный, В. П. Взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / В. П. Счастный, А. И. Жуковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 239–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249>.
9. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности. Проблемы и решения / А. И. Жуковский // *Энергия и Менеджмент*. 2007. № 3. С. 30–33.
10. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский, В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // *Энергия и Менеджмент*. 2013. № 4–5. С. 23–26.
11. Счастный, В. П. Особенности выбора установок компенсации реактивной мощности / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // *Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. Минск: БГАТУ, 2019. Ч. 1. С. 393–394.*
12. Козловская, В. Б. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557>.
13. Пекелис, В. Г. Потребляемая и генерируемая реактивная энергия. Порядок расчетов с абонентами / В. Г. Пекелис, А. И. Жуковский // *Энергетика и ТЭК*. 2004. № 10. С. 12–14.
14. Жуковский, А. И. Новые технико-экономические условия и подходы к расчетам с потребителями за реактивную энергию / А. И. Жуковский // *Агропанорама*. 2005. № 6. С. 26–30.

Поступила 03.12.2020 Подписана в печать 23.02.2021 Опубликована онлайн 31.01.2022

## REFERENCES

1. Ivanov V. S., Sokolov V. I. (1987) *Consumption Regimes and the Quality of Electricity Power Systems of Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 336 (in Russian).
2. Zhukouski A. I. (2007) Efficiency of the Use of Filtration-Compensating Devices by the Case of the Steel Wire Workshop No 1 of the Belarusian Steel Works. *Metallurgiya i Liteinoe Proizvodstvo 2007. Belarus': Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Zhlobin, 6–7 Sent. 2007* [Metallurgy and Foundry Production 2007. Belarus: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Zhlobin, Sept. 6–7, 2007]. Zhlobin, Belarusian Steel Works Industry Association, 99–101 (in Russian).
3. Zhukouski A. I. (2008) Compensation of Reactive Power and Improving the Quality of Electricity in the Electrical Grids of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 38–42 (in Russian).
4. State Standard 32144–2013. *Electric Power. The Electromagnetic Compatibility of Technical Devices. Quality Standards of Electricity in General Purpose Electricity Systems*. Minsk, BelSIS Publ. 2016. 19 (in Russian).
5. Zhukouski A. I. (2008) Compensation of Reactive Power and Improving the Quality of Electricity in the Electrical Grids of Industrial Enterprises. *METALL Inform*, (4), 39–42 (in Russian).
6. Zhukouski A. I. (2007) Filter-Compensating Devices to Compensate for Reactive Power and Improve the Quality of Electricity in the Electrical Grids of Steel Mills. *Metallurgiya i Liteinoe Proizvodstvo 2007. Belarus': Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Zhlobin, 6–7 Sent. 2007* [Metallurgy and Foundry Production 2007. Belarus: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Zhlobin, Sept. 6–7, 2007]. Zhlobin, Belarusian Steel Works Industry Association, 118–120 (in Russian).
7. Zhukouski A. I. (2015) Towards the Problem of the Design of Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (2), 20–30 (in Russian).
8. Schasny V. P., Zhukouski A. I. (2021) On the Mutual Influence of Voltage Control Modes and the Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 239–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249> (in Russian).
9. Zhukouski A. I. (2007) Reactive Power Compensation. Problems and Solutions. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 30–33 (in Russian).
10. Zhukouski A. I., Schasny V. P., Zelen'kevich A. I. (2013) Compensation of Reactive Power in Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4–5), 23–26 (in Russian).
11. Schasny V. P., Zelen'kevich A. I. (2019) Specific Features of the Selection of Reactive Power Compensation Installations. *Tekhnicheskoe i Kadrovoe Obespechenie Innovatsionnykh Tekhnologii v Sel'skom Khozyaistve: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Ch. 1* [Technical and Human Resources Provision of Innovative Technologies in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Part 1]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 393–394 (in Russian).
12. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Consideration of the Impact of High Harmonics when Selecting the Conductor Cross-Sections of Lines of Outdoor Lighting. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557> (in Russian).
13. Pekelis V. G., Zhukouski A. I. (2004) Consumed and Generated Reactive Energy. Order of Payments with Costumers. *Energetika i TEK* [Energy and Fuel and Energy Complex], (10), 12–14 (in Russian).
14. Zhukouski A. I. (2005) New Feasibility Study and Approaches to Payments with Consumers for Reactive Energy. *Agropanorama* [Agricultural Panorama], (6), 26–30 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66>

УДК 658.26:666.97.035.5:004.94

## **Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках**

**В. Н. Романюк<sup>1)</sup>, А. М. Нияковский<sup>2)</sup>, А. Н. Чичко<sup>3)</sup>, Ю. В. Яцкевич<sup>3)</sup>,  
Т. Н. Рыжова<sup>4)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>Открытое акционерное общество «Пеленг» (Минск, Республика Беларусь),

<sup>4)</sup>Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики» (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Приведены результаты численных исследований, выполненных на основе разработанной авторами статьи математической модели, посвященных изучению влияния различных факторов на характеристики процесса тепловой обработки композитных изделий в промышленных теплотехнологических установках при наличии внутренних тепловыделений, распределенных по объему отдельных слоев изделия. Предложена формулировка граничных условий для этой модели с учетом многослойной структуры изделий и особенностей организации процесса их тепловой обработки в теплотехнологической установке. Подробное описание математической модели представлено в предыдущих работах. В данном исследовании в качестве характеристик процесса тепловой обработки изучены функции распределения температуры и коэффициента (степени) гидратации в пространственных областях, составляющих изделие. Рассмотрены модельные композитные изделия одинаковой формы и структуры, но разного объема, состоящие из двух слоев материала, в которых протекает экзотермическая реакция гидратации, разделенных слоем пенополистирола. Температурно-временной режим тепловой обработки принимался близким к используемому в промышленных условиях при производстве трехслойных наружных стеновых панелей. Граничные и начальные условия соответствовали режиму тепловой обработки на плоских стендах с водяным подогревом и укрытием изделий сверху. Установлено, что наличие теплоизоляционного слоя в середине изделия, разделяющего слои с внутренним источником тепловыделений, существенным образом изменяет распределение значений температуры и коэффициента гидратации в верхнем и нижнем слоях. Увеличение характерного объема изделия ведет к существенному возрастанию влияния внутренних объемных тепловыделений на процессы нагрева и гидратации, обусловленные протеканием реакции гидратации.

**Ключевые слова:** теплотехнологическое оборудование, тепловая обработка композитных изделий, численные методы исследований, температурное поле, степень гидратации, теплотехнологии

**Для цитирования:** Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках / В. Н. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66>

---

### **Адрес для переписки**

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

### **Address for correspondence**

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

---

## Numerical Analysis of the Characteristics of the Heat Treatment Process of Multilayer Composite Products in Heat Technology Installations

V. N. Romaniuk<sup>1)</sup>, A. M. Niyakovskii<sup>2)</sup>, A. N. Chichko<sup>3)</sup>, Yu. V. Yatskevich<sup>3)</sup>,  
T. N. Ryzhova<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus),

<sup>3)</sup>Joint-Stock Company "Peleng" (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>4)</sup>The Branch of Belarusian National Technical University "Institute of Improvement of Professional Skills and Staff Retraining on New Directions of Engineering, Technology and Economy" (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The results of numerical studies carried out on the basis on a mathematical model developed by the authors of this paper devoted to the investigation of the influence of various factors on the characteristics of the process of heat treatment of composite products in industrial heat technology installations in the presence of internal heat emissions distributed over the volume of individual layers of the product are presented. The formulation of boundary conditions for this model is proposed, considering the multilayer structure of products and the peculiar properties of the organization of their heat treatment process in a heat technology installation. A detailed description of the mathematical model was presented in the previous works. In this study, the functions of temperature distribution and the coefficient (degree) of hydration in the spatial regions that make up the product have been studied as characteristics of the heat treatment process. Model composite products of the same shape and structure but of different volume, consisting of two layers of material in which an exothermic hydration reaction takes place separated by a layer of expanded polystyrene were considered. The temperature-time regime of heat treatment was assumed to be close to that used in industrial conditions in the production of three-layer external wall panels. The boundary and initial conditions corresponded to the conditions of heat treatment on flat stands with water heating and sheltering products from above. It has been determined that the presence of a thermal insulation layer in the core of the product separating the layers that have an internal heat source, changes the distribution of temperature values and the hydration coefficient in the upper and lower layers significantly. An increase in the characteristic volume of the product leads to an increase in the influence of internal volumetric heat release on the processes of heating and hydration, while heat release caused by the course of the hydration reaction begins to have a decisive influence on them.

**Keywords:** thermal technological equipment, heat treatment of concrete products, numerical research methods, temperature field, degree of hydration, heat technologies

**For citation:** Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V., Ryzhova T. N. (2022) Numerical Analysis of the Characteristics of the Heat Treatment Process of Multilayer Composite Products in Heat Technology Installations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66> (in Russian)

### Введение

В ходе ранее проведенных исследований авторами разработана математическая модель с пространственно распределенными параметрами нестационарного процесса ускоренной тепловой обработки (ТО) композитного изделия, имеющего сложную структуру и геометрическую форму. При наличии внутренних объемных тепловыделений она позволяет рассчитать, в зависимости от времени ТО, величину и мощность технологически обусловленного потребления тепловой энергии, распределение значений температуры и коэффициента гидратации в пределах изделия и конструктивных элементов теплотехнологической установки (ТТУ) [1–5].

В данной статье представлено использование этой математической модели на примере ТО композитного трехслойного бетонного изделия в про-

мышленной ТТУ. Бетонное изделие рассматривается как совокупность пространственных областей  $\Omega_j$ , где значение  $j = 1$  соответствует области твердеющего бетона,  $j = 2$  – опалубки,  $j = 3$  – паровоздушной среды,  $j = 4$  – нагревателя,  $j = 5$  – теплоизоляционного слоя.

Модель включает: нестационарное уравнение теплопроводности с распределенным источником тепловыделения (1), уравнение для мощности источника тепловыделения (2), дополненное уравнением (3), нестационарное уравнение теплопроводности (4) и систему начальных и граничных условий (5)–(10), отражающих особенности процесса ТО в ТТУ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_b \rho_b} & \left\{ \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial x} + \right. \\ & + \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right)}{\partial y} + \\ & \left. + \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right)}{\partial z} + \rho_c P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau$  – время, с;  $x, y, z$  – декартовы координаты, м;  $T(x, y, z, \tau)$  – температура бетона в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $\tau$ , °С;  $\rho_b$  – плотность бетона, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_c$  – удельный расход цемента в бетоне, кг/м<sup>3</sup>;  $c_b$  – удельная теплоемкость бетона, Дж/(кг·К);  $Q(x, y, z, \tau)$  – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента в точке с координатами  $(x, y, z)$  на момент времени  $\tau$ , Дж/кг;  $H(x, y, z, \tau) = Q(x, y, z, \tau)/Q_{\max}$  – коэффициент (степень) гидратации цемента;  $Q_{\max}$  – удельная теплота полной гидратации цемента, Дж/кг;  $\lambda_b(H, T)$  – теплопроводность бетона, зависящая от степени гидратации и температуры, Вт/(м·К);  $P_q(Q, T)$  – удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента, Вт/кг,

$$P_q(Q, T) = \frac{\partial Q(T, \tau_{\text{прив}}(Q, T))}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где  $Q$  – суммарная удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента к рассматриваемому моменту времени, Дж/кг;  $Q(T, \tau_{\text{прив}})$  – функция тепловыделения цемента, Дж/кг;  $\tau_{\text{прив}}(Q, T)$  – приведенное время гидратации цемента, соответствующее возрасту бетона аналогичной прочности, которую он набрал бы при температуре выдержки  $T$  без проведения ТО, определяемое на основании известных опубликованных данных.

Распределение тепловыделений и коэффициента гидратации цемента в пространственной области бетона описывается уравнением

$$\frac{\partial Q(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = Q_{\max} \frac{\partial H(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)). \quad (3)$$

Расчеты температуры и коэффициента гидратации в пространственной области бетона  $\Omega_1$  выполняются по (1)–(3), температуры в пространственных областях  $\Omega_2$ – $\Omega_5$  – на основании (4) с подстановкой теплофизических свойств материала ( $\lambda_j$ ,  $c_j$ ,  $\rho_j$ ), заполняющего соответствующую пространственную область:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_j}{c_j \rho_j} \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

Граничные условия разработанной модели, примененные в исследовании, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Граничные условия модели с учетом структуры бетонных изделий и особенностей их тепловой обработки в теплотехнологической установке**

**Boundary conditions of the model that take into account the structure of concrete products and the peculiar features of their heat treatment in a heat technology installation**

Граничное условие	Уравнение для граничного условия
На границе раздела бетон – среда тепловой обработки ( $\Omega_1$ – $\Omega_3$ )	$-\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} =$ $= \alpha \left( T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_3 \cap \Omega_1} - T_{env}(\tau) \right) \quad (5)$
На границе раздела опалубка – среда тепловой обработки ( $\Omega_2$ – $\Omega_3$ )	$-\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} =$ $= \alpha \left( T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_3 \cap \Omega_2} - T_{env}(\tau) \right) \quad (6)$
На поверхности раздела опалубка – бетон ( $\Omega_1$ – $\Omega_2$ )	$\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_2} =$ $= \lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_1} \quad (7)$
На границе раздела нагреватель – столешница ( $\Omega_2$ – $\Omega_4$ ):	$-\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_4} =$ $= \alpha_w \left( T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_4 \cap \Omega_2} - T_w(\tau) \right) \quad (8)$
На границе раздела бетон – пенополистирол ( $\Omega_1$ – $\Omega_5$ )	$\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_5} =$ $= \lambda_{ps} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_5 \cap \Omega_1} \quad (9)$

Окончание табл. 1  
End of Table 1

Граничное условие	Уравнение для граничного условия
На границе раздела опалубка – пенополистирол ( $\Omega_2$ – $\Omega_5$ )	$\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_5} = \lambda_{ps} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_5 \cap \Omega_2}$ (10)
Обозначения: $\partial i$ – $\partial x$ , $\partial y$ или $\partial z$ в соответствии с пространственной ориентацией границы; $\lambda_b$ , $\lambda_{st}$ , $\lambda_{ps}$ – коэффициент теплопроводности соответственно бетона, стали, пенополистирола, Вт/(м·К); $\alpha$ , $\alpha_w$ – то же теплоотдачи на соответствующей граничной поверхности, Вт/(м <sup>2</sup> ·К); $T_{env}(\tau)$ – температура в области паровоздушной среды, °С; $T_w(\tau)$ – то же нагревателя, °С.	

Цель статьи – изучение влияния геометрического объема трехслойных модельных бетонных изделий с теплоизолирующим слоем на функции распределения температуры  $T(x, y, z, \tau)$  и коэффициента гидратации  $H(x, y, z, \tau)$  путем проведения численных исследований с помощью разработанной математической модели и выполнения сравнительного анализа полученных результатов.

### Результаты численных исследований

В качестве объектов выбраны два модельных бетонных изделия трехслойной структуры, симметричные, кубической формы с геометрическими размерами 0,1×0,1×0,1 м (изделие 1) и 0,35×0,35×0,35 м (изделие 2). Теплоизоляционный слой моделирует пенополистирол – материал, наиболее распространенный при промышленном изготовлении наружных ограждающих строительных конструкций.

Вертикальные разрезы изделий, выполненные секущей плоскостью, параллельной грани куба, изображены на рис. 1, 2. Размеры формирующих слоев изделия 1: верхний слой (бетон) – 0,026×0,1×0,1 м, средний слой (пенополистирол) – 0,051×0,1×0,1 м, нижний слой (бетон) – 0,023×0,1×0,1 м; изделия 2: 0,09×0,35×0,35 м, 0,18×0,35×0,35 м, 0,08×0,35×0,35 м соответственно.

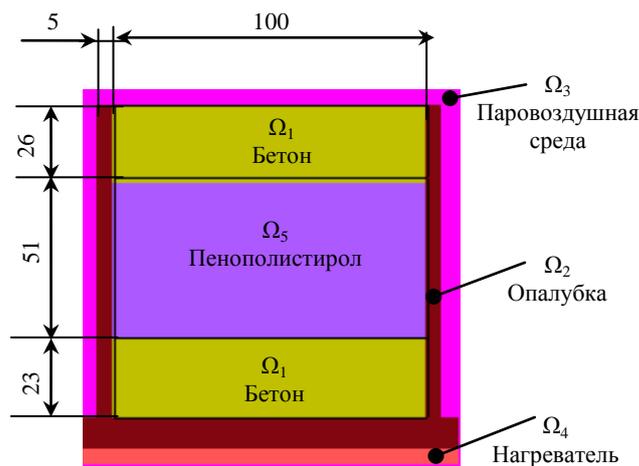


Рис. 1. Пространственные области и их размеры для трехслойного модельного изделия 1 в форме куба с размером ребра 0,1 м

Fig. 1. Spatial areas and their dimensions for a three-layer model product 1 in the form of a cube with an edge size of 0.1 m

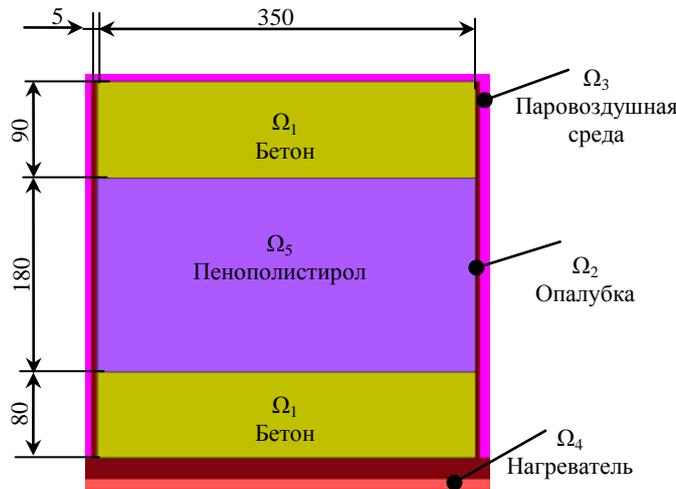


Рис. 2. Пространственные области и их размеры для трехслойного модельного изделия 2 в форме куба с размером ребра 0,35 м

Fig. 2. Spatial areas and their dimensions for a three-layer model product 2 in the form of a cube with an edge size of 0.35 m

Начальные условия модели, использованные в исследовании, учитывали реальный производственный процесс изготовления трехслойных стеновых панелей и представлены совокупностью уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_1} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_1; \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_2} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_2; \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_3} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_3; \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_4} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_4; \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_5} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_5; \\ Q(x, y, z, 0) = 0 \text{ Дж/кг для } (x, y, z) \in \Omega_1, \end{array} \right. \quad (11)$$

где  $T_{\Omega_1}$ ,  $T_{\Omega_2}$ ,  $T_{\Omega_3}$ ,  $T_{\Omega_4}$ ,  $T_{\Omega_5}$  – начальные температуры соответственно бетона, опалубки, паровоздушной среды, нагревателей и теплоизоляционного слоя, °С, в момент времени ТО  $\tau = 0$ , с.

При решении задачи моделирования в качестве режима ТО, имитирующего работу нагревателя и греющей среды, использовали ход температуры, применяемый в производственных условиях на горизонтальном стенде при изготовлении трехслойных наружных стеновых панелей. Температура в пространственной области паровоздушной среды  $\Omega_3$  принята одинаковой. Ее значение в любой момент времени  $T_{env}(\tau)$  соответствовало линейной интерполяции значений из табл. 2, полученной на основании экспериментальных данных.

Таблица 2

**Температурный режим в пространственной области паровоздушной среды  
вблизи верхней грани изделия****Temperature regime in the spatial region of the vapor-air medium  
near the top face of the product**

$\tau$ , ч	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$T$ , °С	24	27	29	30	33	36	39	42	42	42	42	42	42	42	42	42

Температура в пространстве нагревателя ( $\Omega_4$ ) также принята одинаковой. Ее величина в любой момент времени  $T_w(\tau)$  соответствовала линейной интерполяции значений из табл. 3, полученной на основании экспериментальных данных.

Таблица 3

**Температурный режим в пространственной области нагревателя****Temperature regime in the spatial area of the heater**

$\tau$ , ч	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$T$ , °С	36	43	48	49	50	51	52	53	53	53	53	53	53	53	53	53

При выполнении расчетов применяли бетон марки С25/30F100w2 по СТБ 1544–2005 с водоцементным соотношением В/Ц = 0,38 и удельным расходом компонентов (цемента, песка, щебня, воды) соответственно: Ц = 398 кг/м<sup>3</sup>, П = 700 кг/м<sup>3</sup>, Щ = 1140 кг/м<sup>3</sup>, В = 150 кг/м<sup>3</sup>. Плотность влажного бетона, исходя из принципа аддитивности, составила:  $\rho_b = \text{Ц} + \text{П} + \text{Щ} + \text{В} = 2388$  кг/м<sup>3</sup>. В качестве вяжущего использовали портландцемент марки М500 (I42,5Н по ГОСТ 31108–2016).

Значение теплоемкости для данного состава бетона 1050 Дж/(кг·К). Коэффициент теплопроводности бетона  $\lambda_b$  задавали для каждой точки изделия табулированной функцией в зависимости от степени гидратации и температуры по результатам обработки опубликованных экспериментальных данных [6, 7]. Максимальная удельная теплота гидратации использованного цемента (максимальное тепловыделение)  $Q_{\max} = 502,4$  кДж/кг. Динамика тепловыделения цемента при различных температурах определена путем аппроксимации экспериментальных данных [6, 8]. Свойства пенополистирола: удельная теплоемкость  $c_{ps} = 1340$  Дж/(кг·К), плотность  $\rho_{ps} = 15$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda_{ps} = 0,056$  Вт/(м·К) [9, 10].

Схема размещения выделенных для анализа точек в пределах внутреннего пространства трехслойного изделия 1 с размером ребра 0,1 м представлена на рис. 3.

Фрагмент результатов численного расчета распределения температуры в центральном вертикальном сечении изделия 1 в различные моменты времени ТО представлен на рис. 4. На протяжении периода изотермической выдержки характер распределения температуры по пространству остается практически неизменным. Изделие 1 в течение этапа подъема температуры быстро прогревается: верхний слой – до 51 °С (графики 3, 4), нижний слой – до 53 °С (графики 1, 2).

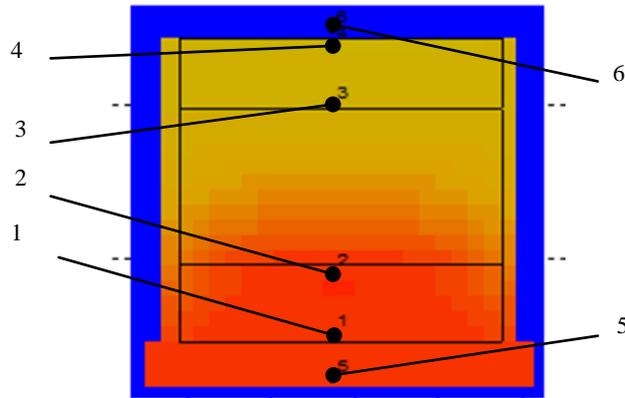


Рис. 3. Схема расположения анализируемых точек изделия 1 в области:  
 1 (координаты 0,0475; 0,0025; 0,0475 м), 2 (0,0475; 0,0225; 0,0475 м), 3 (0,0475; 0,0775; 0,0475 м),  
 4 (0,0475; 0,0975; 0,0475 м) – бетона ( $\Omega_1$ ); 5 (0,0475; -0,0125; 0,0475 м) – нагревателя ( $\Omega_4$ );  
 6 (0,0475; 0,103; 0,0475 м) – паровоздушной среды ( $\Omega_3$ )

Fig. 3. The layout of the points selected for analysis in the vertical central plane of the product 1:  
 1 (coordinates 0.0475; 0.0025; 0.0475 m), 2 (0.0475; 0.0225; 0.0475 m), 3 (0.0475; 0.0775; 0.0475 m),  
 4 (0.0475; 0.0975; 0.0475 m) – of concrete ( $\Omega_1$ ); 5 (0.0475; -0.0125; 0.0475 m) – of a heater ( $\Omega_4$ );  
 6 (0.0475; 0.103; 0.0475 m) – of the vapor-air medium ( $\Omega_3$ )

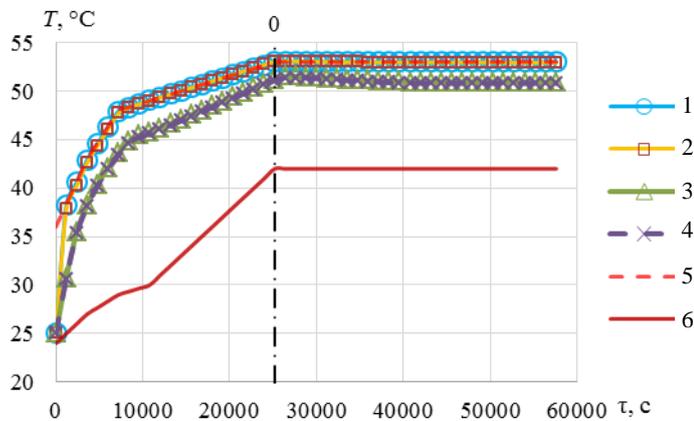


Рис. 4. Графики зависимости температуры от времени тепловой обработки  
 для анализируемых точек изделия 1 в области: 1–4 – бетона ( $\Omega_1$ ); 5 – нагревателя ( $\Omega_4$ );  
 6 – паровоздушной среды ( $\Omega_3$ ); 0 – момент начала изотермической выдержки

Fig. 4. The charts illustrating dependence of the temperature at the selected points of the product 1  
 on the time of heat treatment in the area of: 1–4 – concrete ( $\Omega_1$ ); 5 – heater ( $\Omega_4$ );  
 6 – vapor-air medium ( $\Omega_3$ ); 0 – moment of the beginning of the isothermal exposure

В дальнейшем температура в указанных слоях меняется несущественно. Значения температуры для точек 1, 2 в нижнем слое изделия очень близки и практически совпадают с температурой столешницы ТТУ (рис. 4, график 5). Значения температуры для точек 3, 4 в верхнем слое изделия также близки, однако они ниже, чем для точки 5, приблизительно на 2 °С из-за охлаждающего влияния паровоздушной среды (график 6).

На рис. 5 приведены фрагменты компьютерной эмуляции результатов численных расчетов в сечениях  $XY$ ,  $YZ$ ,  $XZ$  изделия 1 в различные моменты времени режима ТО. В верхней правой части экранов размещена шкала, позволяющая установить величину температуры в любой точке пространства бетонного изделия. Хорошо видно, что средний теплоизолирующий слой пенополистирола препятствует прогреву верхнего слоя бетона.

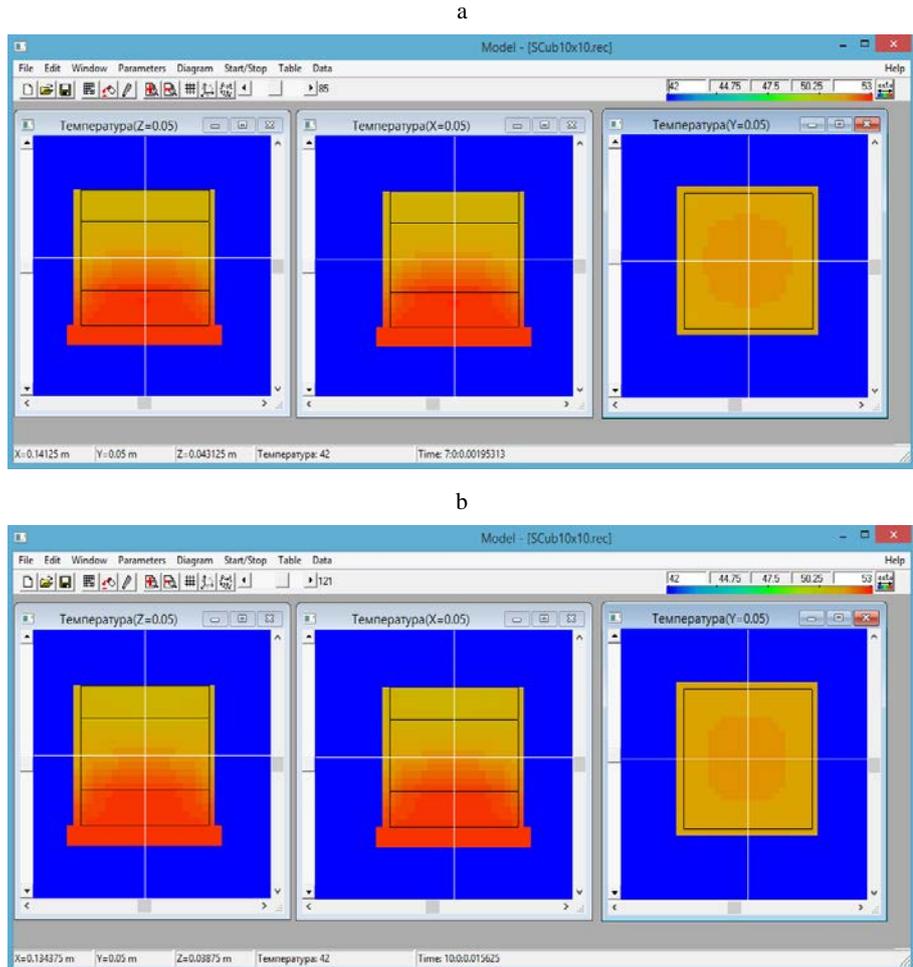


Рис. 5. Фрагмент компьютерной эмуляции результатов численного моделирования распределения температуры для изделия 1 в проекциях  $XY$ ,  $YZ$ ,  $XZ$  через:  
а – 7 ч тепловой обработки; б – 10 ч

Fig. 5. A fragment of computer emulation of the results of numerical simulation of the temperature distribution for product 1 in the projections  $XY$ ,  $YZ$ ,  $XZ$  after:  
а – 7 h of heat treatment; б – 10 h of heat treatment

Зависимость коэффициента гидратации и температуры от времени тепловой обработки в выделенных точках изделия 1 представлена на рис. 6.

Анализ рис. 6, а также фрагментов компьютерной эмуляции результатов численного моделирования в различные моменты времени ТО (рис. 7)

показывает, что характер распределения значений коэффициента гидратации по объему изделия и во времени отличается неравномерностью. Так, в результате теплоотдачи от бетона к опалубке в нижнем слое бетона краевые зоны имеют степень гидратации на ~0,15 % меньше, чем в его середине, а в верхнем слое изделия, наоборот, на 0,15–0,2 % больше, чем в середине. Коэффициент гидратации верхнего слоя бетона в течение периода изотермической выдержки на 1–2 % меньше, чем степень гидратации нижнего слоя, что является отражением аналогичной зависимости для температуры в этих точках (рис. 4).

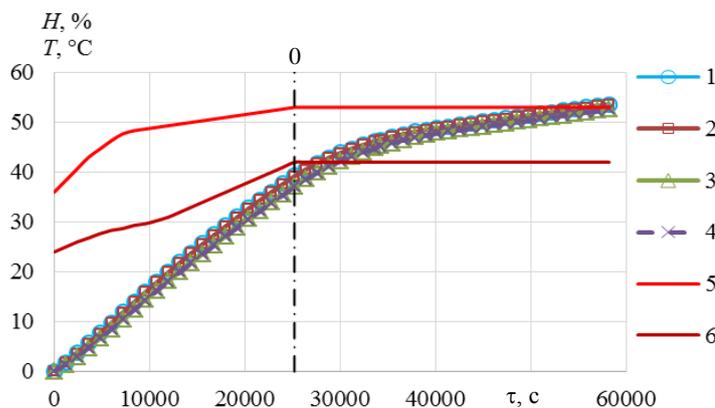


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента гидратации в области бетона ( $\Omega_1$ ) (линии 1–4) и температуры в области: 5 – нагревателя ( $\Omega_4$ ); 6 – паровоздушной среды ( $\Omega_3$ ) от времени тепловой обработки для анализируемых точек изделия 1; 0 – момент начала изотермической выдержки

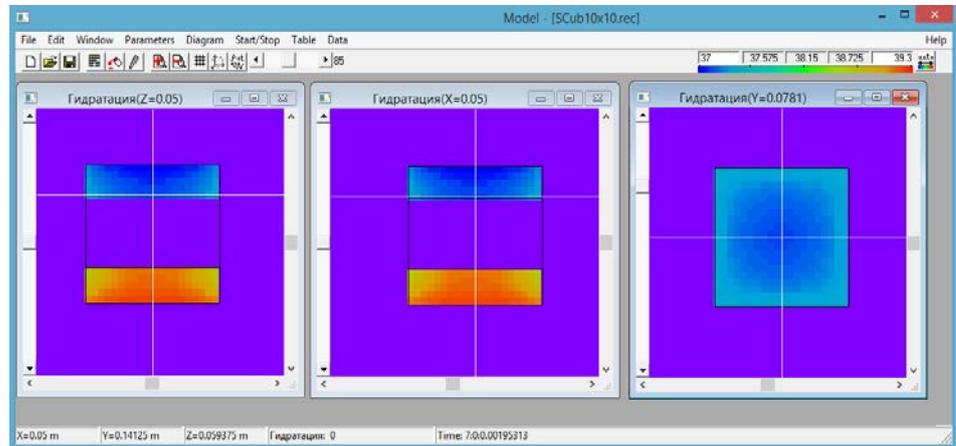
Fig. 6. The charts illustrating dependence of the hydration coefficient in the area of concrete ( $\Omega_1$ ) (lines 1–4) and the temperature on the time of heat treatment at the selected points of the product 1: 5 – in the heater area ( $\Omega_4$ ); 6 – in the area of the vapor-air medium ( $\Omega_3$ ); 0 – moment of the beginning of the isothermal exposure

Коэффициент гидратации в интервале времени ТО с 7 до 10 ч изменяется от 39,3 до 47,4 %, что отражено на цифровой шкале в верхнем правом углу рис. 7.

В целом процесс гидратации обоих слоев изделия 1 проходит приблизительно одинаково, и к концу периода изотермической выдержки степень гидратации достигает уровня ~52 % (верхний слой) и ~54 % (нижний слой). В пространственной области пенополистирола ( $\Omega_5$ ) гидратация не происходит (рис. 7).

Значения коэффициента гидратации в слоях распределены практически однородно (рис. 6), и по мере увеличения времени ТО в нижней и верхней частях изделия 1 они различаются не более чем на 1%. Вместе с тем достигнутая степень гидратации в верхнем слое бетона остается меньшей, чем в нижнем, на всем протяжении ТО.

а



б

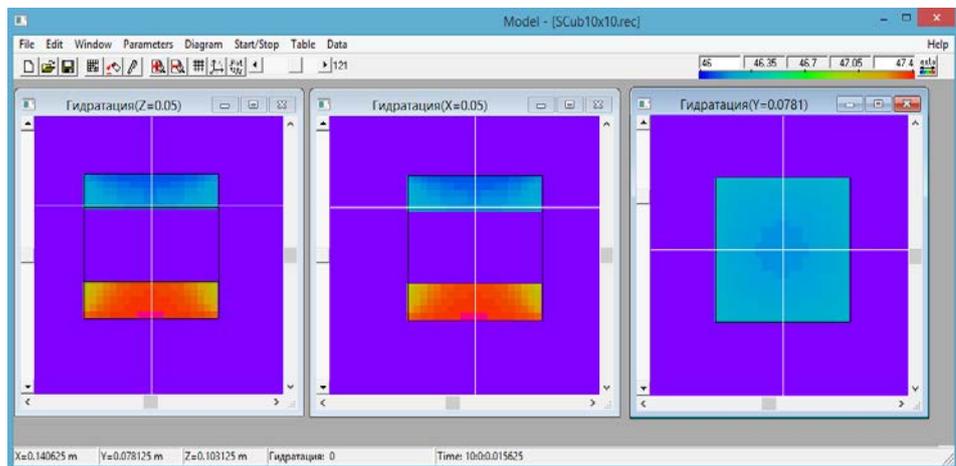


Рис. 7. Фрагмент компьютерной эмуляции результатов численного моделирования распределения значений коэффициента гидратации для изделия 1 в проекциях XY, YZ, XZ через: а – 7 ч тепловой обработки; б – 10 ч

Fig. 7. A fragment of computer emulation of the results of numerical modeling of the distribution of the values of the hydration coefficient for product 1 in the projections XY, YZ, XZ after: а – 7 h of heat treatment; б – 10 h of heat treatment

В ходе дальнейших исследований выполнены численные расчеты для изделия 2 с размером ребра 0,35 м.

Схема размещения анализируемых точек в пределах внутреннего пространства аналогична представленной для изделия 1 (рис. 3). На рис. 8 приведены зависимости температуры от времени ТО в выделенных точках изделия 2. Компьютерная эмуляция распределения температуры в объеме изделия показана на рис. 9.

Зависимости коэффициента гидратации от времени ТО в выделенных точках изделия 2 приведены на рис. 10. Визуализация результатов компьютерного моделирования процесса гидратации представлена на рис. 11.

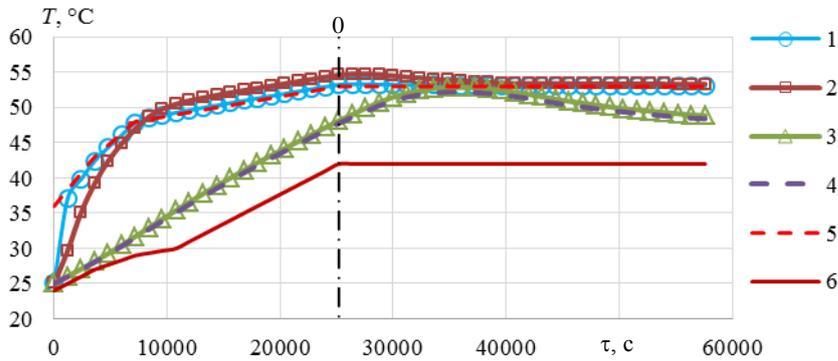
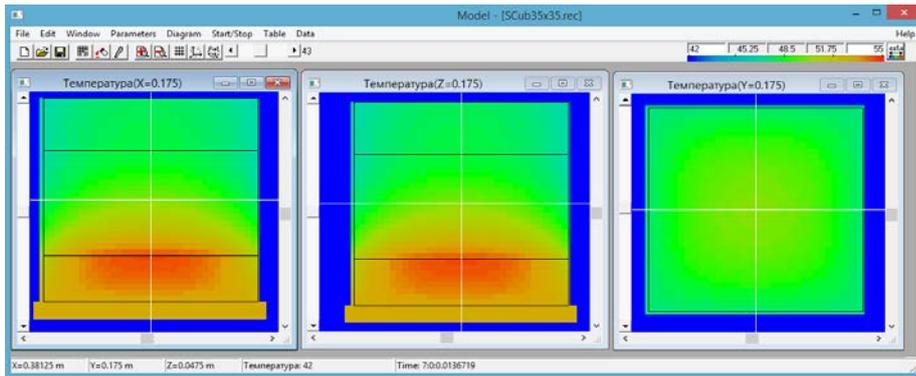


Рис. 8. Графики зависимости температуры от времени тепловой обработки для анализируемых точек изделия 2 в области: 1–4 – бетона ( $\Omega_1$ ); 5 – нагревателя ( $\Omega_4$ ); 6 – паровоздушной среды ( $\Omega_3$ ); 0 – момент начала изотермической выдержки

Fig. 8. The charts expressing dependence of the temperature at the selected points of the product 2 on the time of heat treatment in the area of: 1–4 – concrete ( $\Omega_1$ ); 5 – heater ( $\Omega_4$ ); 6 – vapor-air medium ( $\Omega_3$ ); 0 – moment of the beginning of the isothermal exposure

a



b

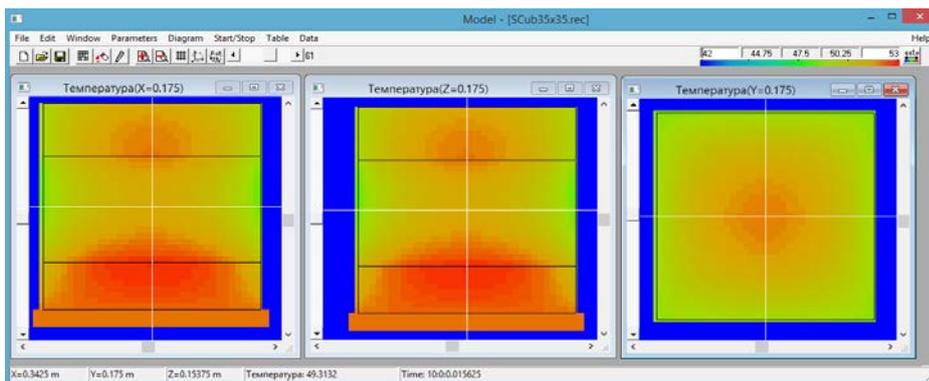


Рис. 9. Фрагмент компьютерной эмуляции результатов численного моделирования распределения температуры для изделия 2 в проекциях YZ, YX, XZ через: а – 7 ч тепловой обработки; б – 10 ч

Fig. 9. A fragment of computer emulation of the results of numerical simulation of the temperature distribution for product 2 in the projections YZ, YX, XZ after: а – 7 h of heat treatment; б – 10 h of heat treatment

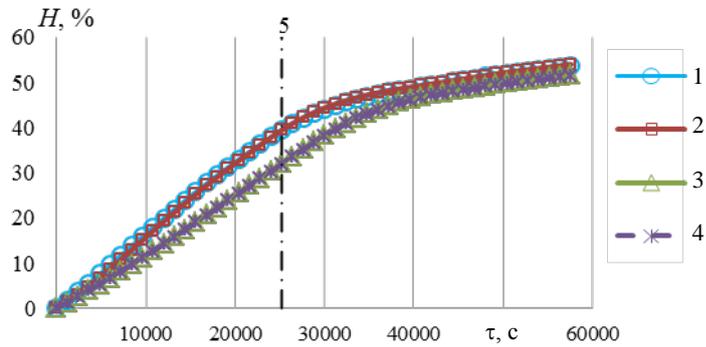


Рис. 10. Графики зависимости коэффициента гидратации от времени тепловой обработки для анализируемых точек изделия 2: 1–4 – в области бетона ( $\Omega_1$ ); 5 – момент начала изотермической выдержки

Fig. 10. The charts illustrating dependence of the hydration coefficient at the selected points of the product 2 on the time of heat treatment: 1–4 – in the area of concrete ( $\Omega_1$ ); 5 – moment of the beginning of the isothermal exposure

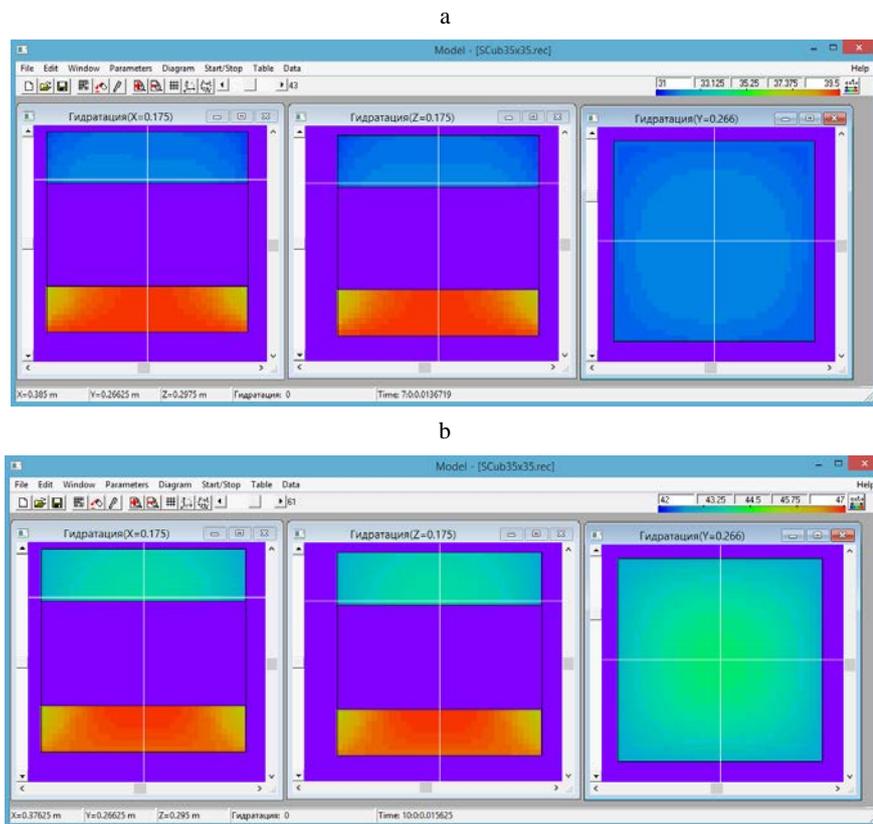


Рис. 11. Фрагмент компьютерной эмуляции результатов численного моделирования распределения значений коэффициента гидратации для изделия 2 в проекциях YZ, YX, XZ через: а – 7 ч тепловой обработки; б – 10 ч

Fig. 11. A fragment of computer emulation of the results of numerical modeling of the distribution of the hydration coefficient values for product 2 in the projections YZ, YX, XZ after: а – 7 h of heat treatment; б – 10 h of heat treatment

Через 2,3 ч с момента начала ТО в нижнем слое изделия 2 вблизи его центральной оси симметрии образуется область точек, где температура выше, чем в области нагревателя. К исходу 7 ч это различие достигает максимального значения (55 °С против 53 °С), а затем постепенно уменьшается (рис. 8). Температура в верхнем слое поднимается до максимума 53 °С к 10 ч, а затем постепенно уменьшается до 49 °С к 16 ч. К этому времени степень гидратации в верхнем слое изделия 2 достигает величины ~52,5 %, а в нижнем ~57,5 %, что больше, чем для изделия 1 меньшего размера (52 и 54 % соответственно). При этом в большем изделии различие в степени гидратации верхнего и нижнего слоев выражено значительнее, чем в изделии меньшего объема.

### ВЫВОДЫ

1. На примере трехслойного композитного изделия, состоящего из двух слоев бетона, разделенных слоем утеплителя из пенополистирола, выполнено численное моделирование распределения температуры и коэффициента (степени) гидратации в пределах пространственных областей изделий разного объема в условиях их тепловой обработки на плоском стенде.

2. Краевые зоны в нижнем слое изделия имеют степень гидратации на ~0,15 % меньше, чем в его середине, а в верхнем слое – на 0,15–0,2 % больше, чем в середине.

3. Коэффициент гидратации в верхнем слое изделия в течение периода изотермической выдержки на 1–2 % меньше, чем в нижнем слое.

4. Распределение температуры и значений коэффициента гидратации в трехслойных изделиях разных размеров существенно отличается, причем с увеличением характерного размера изделия до 0,35 м и более на процессы нагрева и гидратации определяющее влияние начинают оказывать тепловыделения, обусловленные протеканием реакции гидратации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов / А. М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191>.
2. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский [и др.] // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 2. С. 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145>.
3. Дискретная оптимизация программно управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292>.
4. Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А. М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-327-324>.
5. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А. М. Нияковский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2019. Т. 63, № 4. С. 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505>.
6. Ge, Zh. Predicting Temperature and Strength Development of the Field Concrete [Electronic Resource] / Zh. Ge // Iowa State University Digital Repository. 2005. Mode of access: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtd>. Date of access: 14.12.2018.

7. Красулина, Л. В. Структурные и теплофизические свойства твердеющего бетона / Л. В. Красулина // Наука и техника. 2012. № 2. С. 29–34.
  8. Марьямов, Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н. Б. Марьямов. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.
  9. Строительная теплотехника. Строительные правила Республики Беларусь СП 2.04.01–2020. Введ. 20.01.2021. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 72 с.
  10. Плотность, теплопроводность, теплоемкость строительных, теплоизоляционных и других материалов [Электронный ресурс] // Thermalinfo.ru – Теплопроводность, теплоемкость, плотность, вязкость, температуропроводность и другие свойства веществ в таблицах. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmateriale/teplovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost>. Дата доступа: 12.12.2018.
- Поступила 02.09.2021 Подписана в печать 09.11.2021 Опубликована онлайн 31.01.2022

## REFERENCES

1. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Improving the Energy Efficiency of Heat-Technical Equipment on the Basis of Numerical Simulation of Non-Stationary Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191> (in Russian).
2. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yaczkevich Yu. V. (2019) Verification of Non-Stationary Mathematical Model of Concrete Hardening in Thermal Technological Installations. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (2), 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145> (in Russian).
3. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Discrete Optimization of Software-Controlled Modes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat-Technological Facilities. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292> (in Russian).
4. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) The Method of Calculation of the Evolution of Thermal and Energy Characteristics of the Accelerated Hydration Process of Concrete Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-327-324> (in Russian).
5. Niyakovski A. M., Ramaniuk U. N., Chychko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) Unsteady Model of the Hydration Process of a Reinforced Concrete Product at Software-Controlled Heating. *Doklady Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi = The Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 63 (4), 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505> (in Russian).
6. Ge Zh. (2005) Predicting Temperature and Strength Development of the Field Concrete. Iowa State University Digital Repository. Available at: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtid> (Accessed 14 December 2018).
7. Krasulina L. V. (2012) Structural and Thermophysical Properties of Hardening Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 29–34 (in Russian).
8. Mar'yamov N. B. (1970) *Heat Treatment of Products at the Plant of Precast Concrete (Processes and Installations)*. Moscow, Stroizdat Publ. 272 (in Russian).
9. SP 2.04.01–2020. *Construction Heat Engineering. Building Regulations of the Republic of Belarus*: Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. 2020. 72 (in Russian).
10. Density, Thermal Conductivity, Heat Capacity of Construction, Thermal Insulation and Other Materials. *Thermalinfo.ru*. Available at: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmateriale/teplovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost> (Accessed 12 December 2018) (in Russian).

Received: 2 September 2021 Accepted: 9 November 2021 Published online: 31 January 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75>

УДК 621.311.25:621.039

## Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР

В. В. Сорокин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Система удаления водорода обеспечивает водородную безопасность. На АЭС с ВВЭР она состоит из пассивных каталитических рекомбинаторов водорода. Расчет устройств имеет большое значение для обоснования безопасности, поскольку сложные условия аварии на энергоблоке невоспроизводимы в экспериментах. Рекомбинатор состоит из корпуса и кассеты с каталитическими элементами, конструкция которых обеспечивает прохождение газообразной среды через устройство. При контакте с катализатором происходит химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением теплоты, в результате концентрация водорода под оболочкой снижается. Проблемой является пуск из холодного состояния: активность холодного катализатора низка, а тяга не наблюдается до нагрева катализатора и формирования столба теплого газа внутри устройства. Переход из холодного состояния в рабочее занимает определенное время, в течение которого производительность рекомбинатора меньше номинальной. Время пуска – важный для безопасности параметр. В статье проведен расчет времени пуска рекомбинатора водорода с каталитическим блоком в форме эквидистантных параллельных каталитических пластин. Используются средние по местному сечению величины и коэффициенты передачи, последние учитывают влияние свободной конвекции и химической реакции. Скорость газа определяется по балансу сил плавучести и сопротивления. Расчетные и известные из научно-технической литературы данные совпадают удовлетворительно. В качестве консервативной оценки времени пуска рекомбинатора рекомендуется использовать величину 300 с. Рост температуры практически не влияет на запуск рекомбинатора с активным катализатором, повышение концентрации водорода ускоряет запуск, понижение давления его замедляет. Полученные результаты могут использоваться при обосновании безопасности АЭС с ВВЭР и экспертизе отчетов по обоснованию безопасности энергоблоков.

**Ключевые слова:** АЭС, ВВЭР, водородная безопасность, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, время пуска, расчеты

**Для цитирования:** Сорокин, В. В. Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Сорокин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 67–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75>

---

### Адрес для переписки

Сорокин Владимир Владимирович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-91-45  
sorokin.npp@gmail.com

### Address for correspondence

Sorokin Vladimir V.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-91-45  
sorokin.npp@gmail.com

---

## Calculation of Start-Up Time of Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of Localization Safety System of a Nuclear Power Plant Equipped with VVER

V. V. Sorokin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The hydrogen removal system ensures hydrogen safety. At a VVER nuclear power plant, it consists of passive catalytic hydrogen recombiners. The calculation of devices is of great importance for safety justification, since the complex conditions of an accident at a power unit are not reproducible in experiments. The recombiner consists of a casing and a cassette with catalytic elements, the design of which ensures the passage of a gaseous medium through the device. Upon contact with the catalyst, a chemical reaction of hydrogen and oxygen compounds occurs, accompanied by the release of heat; as a result, the concentration of hydrogen under the shell decreases. The problem is starting from a cold state since the activity of the cold catalyst is low, and the thrust is not observed until the catalyst is heated and a column of warm gas is formed inside the device. The transition from the cold state to the working state takes a certain time, during which the recombiner performance is below nominal. The start-up time is a parameter that is important in terms of safety. The article calculates the start-up time of a hydrogen recombiner with a catalytic block in the form of equidistant parallel catalytic plates. Local cross-sectional averages and transmission coefficients are used, the latter taking into account the influence of free convection and chemical reaction. The gas velocity is determined by the balance of buoyant and resistance forces. The calculated data and the data known from the scientific and technical literature coincide satisfactorily. As a conservative estimate of the start-up time of the recombiner, it is recommended to use the value of 300 s. An increase in temperature practically does not affect the start of the recombiner with an active catalyst, an increase in the concentration of hydrogen accelerates the start, and a decrease in pressure slows it down. The results obtained in the study can be used in the justification of the safety of VVER nuclear power plants and the examination of reports on the justification of the safety of power units.

**Keywords:** nuclear power plant, VVER, hydrogen safety, passive catalytic hydrogen recombiner, start-up time, calculations

**For citation:** Sorokin V. V. (2022) Calculation of Start-Up Time of Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of Localization Safety System of a Nuclear Power Plant Equipped with VVER. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 67–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75> (in Russian)

### Введение

На современной атомной электростанции предусмотрены локализирующие системы безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в определенных проектом границах. Границу образует герметичное ограждение (ГО). Согласно нормативным требованиям НП-001-15, безопасность атомной электростанции должна обеспечиваться за счет последовательной реализации концепции глубоко эшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду и системы технических и организационных мер по защите барьеров и сохранению их эффективности. ГО рассматривается как четвертый физический барьер. Уточнение параметров активных зон ВВЭР [1] способствует повышению надежности первых трех барьеров (топливная матрица, оболочка твэла, граница первого контура), но роль четвертого барьера в обеспечении радиационной безопасности насе-

ления и окружающей среды остается ключевой. При выявлении неработоспособности любого из предусмотренных физических барьеров или неготовности мер по его защите следует остановить реакторную установку и привести блок атомной электростанции в безопасное состояние.

Вместе с радиоактивными веществами ГО удерживает и водород, выделяющийся при аварии. Накопление водорода в присутствии кислорода из состава атмосферы в зоне локализации аварии несет опасность формирования горючих и взрывоопасных концентраций этих компонентов. Вероятная последующая реакция водорода с кислородом внутри ГО способна критически увеличить нагрузки на ограждение и вызвать его разрушение. Для защиты ГО и поддержания его работоспособности необходимо решить проблему, связанную с выходом водорода при авариях, особенно при тяжелой аварии с течью и плавлением топлива. В проектах АЭС с ВВЭР предусмотрена система удаления водорода, включающая пассивные каталитические рекомбинаторы водорода [2].

Рекомбинатор состоит из корпуса и кассеты с каталитическими элементами, конструкция которых обеспечивает проход газообразной среды через устройство [2–5]. При контакте с катализатором протекает химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением теплоты. Под ее действием возникает конвективный поток, обеспечивающий непрерывное поступление реагентов к катализатору и отвод продукта (водяного пара) из устройства. Вход и выход среды осуществляются через окна в корпусе. Концентрация водорода под оболочкой снижается.

Пассивный принцип действия рекомбинатора основан на свойствах энергонезависимости (для ведения каталитического окисления не нужен источник энергии, эта особенность позволяет использовать устройства в сценариях с полным обесточиванием АЭС) и самозапуска (гетерогенное каталитическое окисление не требует внешних команд и средств иницирования реакции) [5]. Это в совокупности с независимостью элементов системы сжигания водорода друг от друга и от других систем энергоблока обеспечивает высокую степень надежности [2–8].

Одна из проблем при использовании рекомбинаторов – пуск из холодного состояния. Активность холодного катализатора низка, а тяга не наблюдается до его нагрева и формирования столба теплого газа внутри устройства. Переход из холодного состояния в рабочее занимает определенное время (время пуска), в течение которого производительность рекомбинатора меньше номинальной. Время пуска является важным для безопасности параметром, учитывается при расчетах, обосновывающих безопасность [9–11]. По данным научно-технической литературы, оно в основном укладывается в интервал от 100 до 1000 с и зависит от множества параметров. Так, время пуска может составлять 100 с (при объемной концентрации водорода 4 % и температуре 25 °С) [3], несколько сотен секунд [9], 10 мин после начала выхода водорода [10], 100–300 с [11]. Время выхода на рабочий режим в зависимости от температуры парогазовой смеси и объемной концентрации водорода составляет: не более 10 мин при

температуре до 60 °С и концентрации водорода менее 2 %; не более 3 мин при температуре выше 60 °С и концентрации водорода более 2 % [12]. На практике время пуска однотипных устройств в однотипных условиях может отличаться. Так, самый быстрый старт рекомбинатора «Арева» занял 4 мин после начала подачи водорода, к этому времени молярная доля водорода в воздухе возле устройства составила 0,2 %, а самый медленный – 24 мин при 4,4 % [11].

Время пуска возрастает, если в атмосфере присутствуют специфические химические вещества, снижающие активность катализатора. Их целесообразно делить на яды и блокираторы, но пока некоторые авторы рассматривают эти термины как синонимы. В [11] отмечено, что температура активного катализатора поднимается выше 100 °С за 2–3 мин, тогда как для отравленного катализатора требуется 30 мин. Отмечается увеличение времени пуска рекомбинатора под действием яда или блокиратора [13]. Известным примером блокиратора является монооксид углерода [14], примером каталитического яда – теллур [15]. Молекулы блокиратора адсорбируются катализатором и мешают доступу водорода, при повышении температуры происходит десорбция и активность катализатора восстанавливается. При отравлении ядом активность катализатора снижается необратимо. В ходе эксплуатации рекомбинаторов производится регламентный отжиг каталитических элементов. Если активность элемента не восстанавливается до проектной, его заменяют новым.

Определяющими параметрами времени пуска являются температура катализатора и концентрация водорода, с их увеличением время уменьшается [12]. Старт при пониженном содержании кислорода происходит с задержкой 1–5 мин [4]. Отмечен замедленный старт при давлении ниже 0,75 атм [16].

В научно-технической литературе приводятся различные данные о времени пуска рекомбинаторов, что вызывает затруднения при выборе этой величины для расчетов по обоснованию безопасности, в частности при составлении или экспертизе отчета по обоснованию безопасности энергоблока АЭС. Особенно остро неопределенность проявляется при моделировании проектных аварий, для которых нормы безопасности рекомендуют использовать консервативные оценки и выбирать из имеющегося поля параметров величины, приводящие к самым неблагоприятным реализациям сценариев аварии.

Целью настоящего исследования является расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР для уточнения времени пуска и влияния на процесс следующих параметров: начальной концентрации водорода, начальной температуры, давления под оболочкой. В качестве конкретного рекомбинатора выбрано устройство фирмы «Арева» с каталитическим блоком в форме эквидистантных параллельных пластин, покрытых платиновым катализатором на носителе из оксида алюминия (в гамма-форме). Такими рекомбинаторами могут оснащаться энергоблоки АЭС с ВВЭР [2].

### Модель и алгоритм расчета рекомбинатора

В рекомбинаторе выделяют элементарную ячейку в составе плоского канала, образованного двумя соседними пластинами, вводят направленную вверх ось координат  $Ox$ , совпадающую с осью канала и началом на входе в канал. Ширина канала 20 мм, длина 140 мм. Источником теплоты является реакция окисления водорода на поверхности пластины, водород поступает из потока за счет диффузии. Теплота идет на повышение температуры пластины и подогрев потока. В начале пуска основная доля теплоты аккумулируется в пластинах, в конце – в потоке газа. Пластина имеет сложное строение, основу из двухмиллиметровой жаростойкой стали (лист), воспринимающей механические нагрузки, и тонкий слой из пористой керамики с платинированной поверхностью. Термическое сопротивление слоя и контакта с металлом существенно меньше, чем сопротивление в сторону газа, поэтому всей пластине приписывают температуру  $\Delta T_w(x)$ . Изменение температуры поверхности  $\Delta T_w(x)$  за промежуток времени  $\tau$  составляет

$$\Delta T_w(x) = [h\alpha_D C - \alpha(T_w - T_g)]\tau / c_M \rho_M \delta_M,$$

где  $h$  – теплота сгорания водорода;  $C$  – концентрация водорода,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $T_g$  – температура газа,  $^\circ\text{C}$ ;  $c_M$  – теплоемкость стали,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $\rho_M$  – плотность стали,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta_M$  – толщина пластины, м;  $\alpha_D, \alpha$  – диффузионный и тепловой коэффициенты передачи, определены в [15].

Свойства материалов приведены в [17].

Изменение температуры газа  $\Delta T_g(x)$  составляет

$$\Delta T_g = \alpha(T_w - T_g)(4dx/D)c_p \rho w,$$

где  $D$  – гидравлический диаметр канала, м;  $c_p$  – теплоемкость газа,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $\rho$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w$  – скорость газа (местная средняя по сечению), м/с.

В начале расчета принимают скорость газа на входе 0,1 м/с [18] с направлением вверх, затем по балансу сил плавучести и сопротивления [15]. В качестве газа выбирают воздух.

Алгоритм расчета состоит в определении  $\Delta T_w(x)$ , причем используют  $T_g$  с предыдущего шага по времени, затем вычисляют  $\Delta T_g(x)$  и  $T_g(x)$ . Рассчитывают температуру газа на выходе для корректировки  $w$  и среднюю  $T_w$  для поправки  $\alpha$  и свойств газа. Подогревы стенки суммируют по времени. Близость окончания пуска связывают с приближением расчетных величин температур к стационарным значениям, определенным по [15, 19].

### Результаты расчета

Результаты расчета базового режима пуска рекомбинатора, характеризующегося температурой внутри ГО  $25^\circ\text{C}$ , давлением 1 атм и объемной концентрацией водорода 4 %, представлены на рис. 1, где  $G$  – производительность устройства, отнесенная к стационарной производительности;  $w$  – скорость газа, отнесенная к стационарной скорости;  $T$  – температура газа на выходе из устройства, отнесенная к стационарной температуре;

$t$  – время от начала работы, отнесенное к 500 с;  $n$  – недожог водорода, отношение концентраций на выходе и входе в устройство.

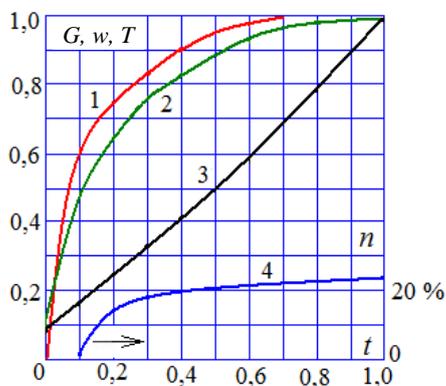


Рис. 1. Изменение характеристик рекомбинатора в процессе пуска:  
1 – производительность; 2 – скорость газа;  
3 – температура на выходе; 4 – недожог  
Fig. 1. Start-up recombiner characteristics alterations: 1 – capacity;  
2 – gas velocity; 3 – outlet temperature;  
4 – hydrogen combustible loss

С течением времени характеристики рекомбинатора водорода стремятся к своим стационарным значениям (рис. 1). Быстрее всего растет производительность, потом скорость газа (или тяга), затем температура газа на выходе. Недожог быстро нарастает с 50 по 100 с, затем увеличивается незначительно. Он обусловлен высокой скоростью газа, вследствие которой водород проскакивает через устройство, не успев прореагировать.

Согласно рис. 1, к 100 с температура устройства существенно возрастает, возникшая тяга приводит к заметному росту скорости газа в устройстве; к 200 с производительность составляет 90 % от номинальной; к 300 с расход газа и производительность практически не отличаются от номинальных. Исключением является температура на выходе, которая растет до 500 с. Этот факт имеет методическое значение: если стоит задача экспериментального определения температуры выхлопной струи рекомбинатора, то время испытания должно быть обоснованно продолжительным. Температура выхлопной струи важна для оценки теплового воздействия на стенки ГО и оборудование, имеющие ограничения по допустимой температуре эксплуатации. В целом время пуска одинаково оценивается источниками [3, 9, 11, 12] в рамках неопределенности данного термина, и эта оценка подтверждается нашими расчетами. В качестве консервативной оценки времени пуска следует использовать величину 300 с, когда производительность устройства практически равна номинальной.

Расчеты влияния начальной температуры, концентрации водорода, пониженного давления на время пуска приведены в табл. 1–3, характеристики рекомбинаторов отнесены к стационарным значениям.

Таблица 1

**Влияние начальной температуры на время пуска рекомбинатора**  
**The effect of the initial temperature on the start-up time of the recombiner**

Температура в герметичном ограждении, °С	Температура газа на выходе	Скорость газа на входе	Производительность	Время, с
125	0,60	0,87	0,89	250
	0,91	1,00	0,96	500
25	0,49	0,89	0,95	250
	0,98	0,99	1,00	500

Таблица 2

**Влияние начальной концентрации водорода на время пуска рекомбинатора****Effect of the initial hydrogen concentration on the start-up time of the recombiner**

Объемная концентрация водорода, %	Температура газа на выходе	Скорость газа на входе	Производительность	Время, с
4	0,49	0,89	0,95	250
	0,98	0,99	1,00	500
2	0,47	0,76	0,83	250
	0,75	0,93	0,98	500
	0,99	1,00	1,00	750

Таблица 3

**Влияние пониженного давления в герметичном ограждении****на время пуска рекомбинатора****Effect of reduced pressure in a sealed enclosure on the start-up time of the recombiner**

Давление, атм	Температура газа на выходе	Скорость газа на входе	Производительность	Время, с
1,0	0,49	0,89	0,95	250
	0,98	0,99	1,00	500
0,5	0,40	0,88	0,73	250
	0,73	1,00	0,85	500
	0,96	1,00	0,95	700

Согласно табл. 1, повышение температуры практически не влияет на запуск рекомбинатора с активным (неблокированным) катализатором. Наблюдаемые на практике ускорения запуска при высоких температурах [12] могут быть связаны с десорбцией мешающих запуску веществ (блокираторы). Повышение концентрации водорода в ГО ускоряет запуск (табл. 2), что соответствует данным [12]. Понижение давления в ГО замедляет запуск (табл. 3), что соответствует данным [16].

**ВЫВОД**

Проведен расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода системы удаления водорода локализирующей системы безопасности энергоблока АЭС. В качестве конкретного рекомбинатора выбрано устройство с каталитическим блоком в форме эквидистантных параллельных пластин, покрытых платиновым катализатором, которыми могут оснащаться энергоблоки АЭС с ВВЭР. Расчетные и известные из научно-технической литературы данные совпадают удовлетворительно. В качестве консервативной оценки времени пуска рекомендуется использовать величину 300 с, так как к этому моменту производительность устройства практически равна номинальной. Повышение температуры почти не влияет на запуск рекомбинатора с активным (неблокированным) катализатором, повышение концентрации водорода ускоряет запуск, понижение давления его замедляет. Полученные результаты могут использоваться при обосновании безопасности АЭС с ВВЭР и экспертизе отчетов по обоснованию безопасности энергоблоков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>.
2. Проект АЭС-2006. Ленинградская АЭС-2 / ОАО «СПбАЭП». СПб.: Ин-т «Атомэнергопроект», 2009. 34 с.
3. AREVA Passive Autocatalytic Recombiner. G-008-V3-13-ENGPB. Erlangen: AREVA GmbH. 2013. 4 p.
4. State of the Art on Hydrogen Passive Autocatalytic Recombiner (European Union Parsoar Project) [Electronic Resource] / F. Arnould [et al.]. Mode of access: [https://inis.iaea.org/collecion/NCLCollectionStore/\\_Public/33/020/33020098.pdf](https://inis.iaea.org/collecion/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020098.pdf). Date of access: 09.02.2018.
5. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И. А. Кириллов [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. Вып. 84, № 2. С. 1–12.
6. Mitigation of Hydrogen Hazards in Water Cooled Power Reactors: IAEA-TECDOC-1196 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2001. 48 p.
7. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2011. 174 p.
8. Национальный доклад Республики Беларусь о целевой переоценке безопасности (стресс-тесты) Белорусской АЭС [Электронный ресурс]. Минск, 2017. Режим доступа: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/88c/national-report-on-belarusian-npr-stress-tests.pdf>.
9. Investigation of a Hydrogen Mitigation System During Large Break Loss-Of-Coolant Accident for a Two-Loop Pressurized Water Reactor / M. Dehjourian [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. 2016. Vol. 48, Iss. 5. P. 1174–1183. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.04.002>.
10. Reinecke, E.-A. Studies on Innovative Hydrogen Recombiners as Safety Devices in the Containments of Light Water Reactors / E.-A. Reinecke, I. M. Tragsdorf, K. Gierling // Nuclear Engineering and Design. 2004. Vol. 230, Iss. 1–3. P. 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2003.10.009>.
11. Rozeń, A. Simulation of Start-Up Behaviour of a Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner / A. Rozeń // Nukleonika. 2018. Vol. 63, Iss. 2. P. 27–41. <https://doi.org/10.2478/nuka-2018-0004>.
12. Пассивные каталитические рекомбинаторы водорода PBK-500, PBK-1000. Технические условия: РЭТ-111.00.000 ТУ. Москва, 2007.
13. Ensuring the Long-Term Functionality of Passive Autocatalytic Recombiners under Operational Containment Atmosphere Conditions – an Interdisciplinary Investigation / S. Kelm [et al.] // Nuclear Engineering and Design. Vol. 239, Iss. 2. P. 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.029>.
14. Bentaib, A. Overview on Hydrogen Risk Research and Development Activities: Methodology and Open Issues / A. Bentaib, N. Meynet, A. Bleyer // Nuclear Engineering and Technology. 2015. Vol. 47, Iss. 1. P. 26–32. <http://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>.
15. Воробьев, В. В. Расчет влияния отравления на производительность пассивного каталитического рекомбинатора водорода [Электронный ресурс] / В. В. Воробьев, В. А. Немцев, В. В. Сорокин. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-137.pdf>.
16. Operational Behavior of a Passive Auto-Catalytic Recombiner under Low Pressure Conditions / P.-M. Steffen [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2017. Vol. 124. P. 1281–1286. <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.019>.
17. Кириллов, П. Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / П. Л. Кириллов, М. И. Терентьева, Н. Б. Денискина. М.: ИздАт, 2007. 200 с.
18. Маркус, Т. А. Здания, климат, энергия / Т. А. Маркус, Э. Н. Моррис. Л.: Гидромет, 1985. 543 с.
19. Сорокин, В. В. Анализ производительности пассивного каталитического рекомбинатора водорода с учетом условий внутри герметичного ограждения локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Сорокин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 178–186. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-178-186>.

Поступила 14.07.2021 Подписана в печать 21.09.2021 Опубликована онлайн 31.01.2022

## REFERENCES

1. Dmitriev S. M., Gerasimov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2020) Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (2), 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162> (in Russian).
2. “SPb Atomenergoproekt” JSC (2009) *NPP-2006 Project. Leningrad NPP-2*. St. Petersburg, Atomenergoproekt Instiute. 34 (in Russian).
3. *AREVA Passive Autocatalytic Recombiner* (2013) G-008-V3-13-ENGPB. Erlangen: AREVA GmbH. 4.
4. Arnould F., Bachellerie E., Auglaire M., De Boeck B., Braillard O., Eckardt B., Ferroni F., Moffett R., Van Goethem G. (2001) *State of the Art on Hydrogen Passive Autocatalytic Recombiner (European Union Parsoar Project)*. Available at: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/020/33020098.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020098.pdf) (Accessed 9 February 2018).
5. Kirillov I., Kharitonova N., Sharafutdinov R., Krenniikov N. (2017) Hydrogen Safety for Nuclear Power Plants with Light Water Reactor Units. Current State of the Problem. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety Journal*, 84 (2), 1–12 (in Russian).
6. International Atomic Energy Agency (2001). *Mitigation of Hydrogen Hazards in Water Cooled Power Reactors: IAEA-TECDOC-1196*. Vienna, 2001. 48.
7. International Atomic Energy Agency (2011). *Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661*. Vienna, 2011. 174.
8. *National Stress-Test Report of the Republic of Belarus on Belarusskaya NPP Targeted Safety Reassessment* (2016). Minsk. Available at: [https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/88c/national-report-on-belarusian-npp-stress\\_tests.pdf](https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/88c/national-report-on-belarusian-npp-stress_tests.pdf) (in Russian).
9. Dehjourian M., Sayareh R., Rahgoshay M., Jahanfarnia G., Shirani A. S. (2016) Investigation of a Hydrogen Mitigation System During Large Break Loss-Of-Coolant Accident for a Two-Loop Pressurized Water Reactor. *Nuclear Engineering and Technology*, 48 (5), 1174–1183. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.04.002>.
10. Reinecke E.-A., Tragsdorf I. M., Gierling K. (2004) Studies on Innovative Hydrogen Recombiners as Safety Devices in the Containments of Light Water Reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 230 (1–3), 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2003.10.009>.
11. Rozeń A. (2018) Simulation of Start-Up Behaviour of a Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner. *Nukleonika*, 63 (2), 27–41. <https://doi.org/10.2478/nuka-2018-0004>.
12. Technical Specifications: RET-111.00.000 TU. *Passive Hydrogen Catalytic Recombiners RVK-500, RVK-1000*. Moscow, 2007 (in Russian).
13. Kelm S., Schoppe L., Dornseiffer J., Hofmann D., Reinecke E.-A., Leistner F., Jühe S. (2009) Ensuring the Long-Term Functionality of Passive Autocatalytic Recombiners under Operational Containment Atmosphere Conditions – an Interdisciplinary Investigation. *Nuclear Engineering and Design*, 239 (2), 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.029>.
14. Bentaib A., Meynet N., Bleyer A. (2015) Overview on Hydrogen Risk Research and Development Activities: Methodology and Open Issues. *Nuclear Engineering and Technology*, 47 (1), 26–32. <http://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>.
15. Vorob'ev V. A., Nemtsev V. A., Sorokin V. V. *Calculation of the Effect of Poisoning on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner*. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-137.pdf> (in Russian).
16. Steffen P.-M., Reinecke E.-A., Meynet N., Bentaib A., Chaumeix N., Allelein H.-J. (2017) Operational Behavior of a Passive Auto-Catalytic Recombiner under Low Pressure Conditions. *Fusion Engineering and Design*, 124, 1281–1286. <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.019>.
17. Kirillov P. L., Terentieva M. I., Deniskina N. B. (2007) *Thermo Physical Properties of Materials of Nuclear Power Technology*. Moscow, Izdat Publ. 200 (in Russian).
18. Markus T. A., Morris E. N. (1980) *Buildings, Climate and Energy*. London, Pitman Publ. 540.
19. Sorokin V. V. (2021) Analysis Catalytic Hydrogen Recombiner Capacity Calculation Taking into Account Conditions Inside Sealed Enclosure of Containment Safety System of Nuclear Power Plants with Water-Water Energetic Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 178–186. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-178-186> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-76-88>

УДК 658.261:621.56

## Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина

А. В. Овсянник<sup>1)</sup>, В. П. Ключинский<sup>1)</sup>

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

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

**Реферат.** Разработана программа для выбора, расчета и термодинамического анализа турбоустановок на органическом цикле Ренкина, позволяющая получить значения оптимальных параметров рабочего тела, а также выбрать рабочее тело с наибольшим эксергетическим коэффициентом полезного действия для циклов на перегретом паре и с промежуточным перегревом. Представлена структура разработанной математической модели для проведения термодинамического анализа. Исследования проводили при давлении до 20 МПа и температурах рабочего тела: перед турбиной до 250 °С, на выходе из конденсатора 25 °С, максимально допустимой на выходе из промежуточного перегревателя 250 °С. Анализ полученных результатов показывает, что промежуточный перегрев в органическом цикле Ренкина, как и в классическом паротурбинном, приводит к повышению эксергетической эффективности. В среднем прирост эксергетического коэффициента полезного действия при оптимальных параметрах составляет 4,28 %, а для некоторых рабочих тел значительно превосходит этот результат (например, 8,14 и 6,56 % для R717 и R32 соответственно), что обусловлено их теплофизическими свойствами. Погрешность для всех низкокипящих рабочих тел не превышает 2 % от полученного результата эксергетической эффективности. Для исследуемых схем на примере хладагента R245FA построены диаграммы Грассмана – Шаргута. Эксергетический анализ показывает, что промежуточный перегрев при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела перед частями высокого и низкого давления турбины приводит к снижению потерь эксергии в котле-утилизаторе, значительному увеличению регенерации в теплообменном аппарате, увеличению потерь эксергии в насосе и их перераспределению в турбоагрегате, теплообменном аппарате и конденсаторе.

**Ключевые слова:** органический цикл Ренкина, хладагент, термодинамическая эффективность, эксергетический анализ, диаграммы Грассмана – Шаргута, промежуточный перегрев, потенциал разрушения озонового слоя, низкокипящее рабочее тело, турбоагрегат, низкопотенциальная энергия

**Для цитирования:** Овсянник, А. В. Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 76–88. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-76-88>

---

### Адрес для переписки

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

### Address for correspondence

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

---

## Selection, Calculation and Thermodynamic Analysis of Turbine Units Based on the Organic Rankine Cycle

A. V. Ovsyannik<sup>1)</sup>, V. P. Kliuchinski<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** A program has been developed for the selection, calculation and thermodynamic analysis of turbine units based on the organic Rankine cycle, which makes it possible to determine the values of the optimal parameters of the working fluid, as well as to select the working fluid with the highest exergetic efficiency for cycles on superheated steam and with intermediate overheating. The structure of the developed mathematical model for thermodynamic analysis is presented. The studies were conducted at pressures up to 20 MPa and temperatures of the working fluid in front of the turbine up to 250 °C; the temperature of the working fluid at the outlet of the condenser was 25 °C, while the maximum temperature of the working fluid at the outlet of the intermediate superheater was 250 °C. The analysis of the results showed that the use of reheating in the organic Rankine cycle – as well as in the classical (i. e. steam turbine) one – led to higher exergetic efficiency of the cycle. On average, for the studied working media, the increase in exergetic efficiency at optimal parameters of the working body was 4.28 %. However, some working media significantly exceeded this result (for example, 8.14 and 6.56 % for R717 and R32, respectively) due to their thermophysical properties. The error for all low-boiling working media did not exceed 2 % of the obtained result of exergetic efficiency. Grassmann – Shargut charts were made for the studied circuits using the example of the refrigerant R245FA. Exergetic analysis demonstrated that intermediate overheating at thermodynamically optimal parameters of the working media before the high and low pressure parts of the turbine causes a decrease in exergy losses in the heat recovery boiler, a significant increase in regeneration in the heat exchanger, an increase in exergy losses in the pump and their redistribution in the turbine unit, heat exchanger and condenser.

**Keywords:** organic Rankine cycle, refrigerant, thermodynamic efficiency, exergetic analysis, Grassmann – Shargut charts, intermediate overheating, ozone layer destruction potential, low-boiling working media, turbine unit, low-potential energy

**For citation:** Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2022) Selection, Calculation and Thermodynamic Analysis of Turbine Units Based on the Organic Rankine Cycle. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 76–88. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-76-88> (in Russian)

### Введение

Органический цикл Ренкина (ОЦР) является альтернативой классическому паротурбинному циклу. Его применение предпочтительнее (с технико-экономической точки зрения) при температурах рабочего тела перед турбиной 250 °C и ниже [1, 2]. Это обусловлено снижением эффективности паротурбинного цикла при столь низких значениях температуры рабочего тела, сложностью конструкции и, как следствие, более высокой стоимостью установки. Так, согласно [3], установка на ОЦР (с учетом всех сопутствующих расходов на монтаж, проектирование и т. д.) обойдется в 800–900 дол./кВт, тогда как стоимость паротурбинной установки соизмеримой мощности от 1000 дол./кВт. Таким образом, ОЦР приобретает все более широкое распространение в альтернативной энерге-

тике для утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов, а также при сжигании топлив с низкой теплотворной способностью [2–5].

Комбинированное получение электроэнергии, теплоты и холода (тригенерация) – один из новых способов энергосбережения [6, 7]. Тригенерационные комплексы эффективны как в различных отраслях промышленности, так и в сфере услуг и жилищно-коммунальном хозяйстве [8]. В настоящее время турбоустановки (ТУ) на ОЦР рассматриваются в качестве элементов тригенерационных установок, применяемых в том числе для производства углекислоты [9–12].

Исследования, проведенные для циклов на водяном паре (классический цикл Ренкина), показали, что существуют оптимальные параметры рабочего тела, при которых достигается максимальная термодинамическая эффективность [13]. Однако множество низкокипящих рабочих тел (НКРТ), в отличие от воды, имеют «сухую» либо «изоэнтропную» линию насыщенного пара на  $T$ - $s$ -диаграмме [4] и, как следствие, в конце процесса расширения остаются в перегретом состоянии. При этом изменение параметров рабочего тела перед турбиной приводит к их изменению на выходе из нее, в том числе температуры. Таким образом, применение методики и результатов, полученных для паровых циклов с эквивалентным циклом Карно и неизменной эквивалентной конечной температурой [13], становится невозможным.

Проведенные исследования [14, 15] для схем на органическом цикле Ренкина показали, что в ОЦР также существуют свои оптимальные параметры рабочего тела перед турбиной (температура и давление), при которых эксергетический КПД достигает максимального значения. Аналогичные результаты характерны и для ОЦР с промежуточным перегревом рабочего тела.

Таким образом, целью исследований является изучение влияния промежуточного перегрева на эксергетическую эффективность ТУ на ОЦР для различных НКРТ при термодинамически оптимальных параметрах.

### **Исследуемые схемы и принцип их работы**

В статье рассмотрены два характерных цикла ТУ на ОРЦ: на перегретом паре (рис. 1) и с промежуточным перегревом рабочего тела (рис. 2).

Принцип работы исследуемой схемы: из конденсатора жидкое низкокипящее рабочее тело насосом подается в теплообменный аппарат, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, испаряется и перегревается. Далее поступает в турбину, где совершает механическую работу вращения вала, связанного муфтой с генератором электрического тока. В схеме с промежуточным перегревом НКРТ, пройдя часть высокого давления (ЧВД) турбины, снова попадает в котел-утилизатор, где повторно перегревается и поступает в часть низкого давления (ЧНД) турбины. После

совершения работы в турбине НКРТ, будучи еще в перегретом состоянии, охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения при данном давлении в теплообменном аппарате, и направляется в конденсатор, где и конденсируется.

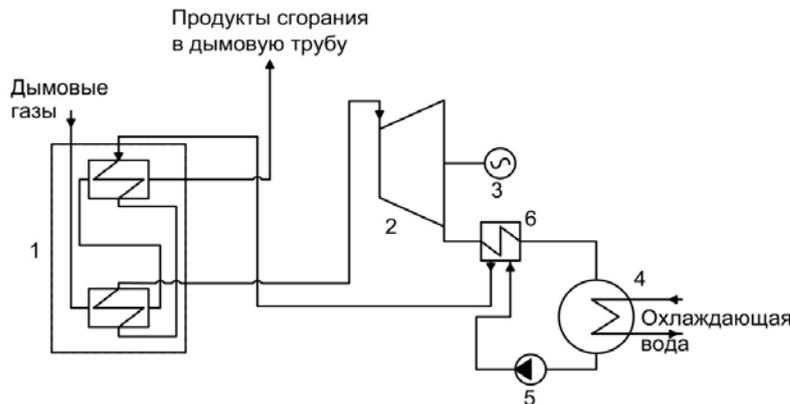


Рис. 1. Схема органического цикла Ренкина на перегретом паре: 1 – котел-утилизатор; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

Fig. 1. The scheme of organic Rankine cycle for superheated steam: 1 – heat recovery boiler; 2 – turbine; 3 – generator; 4 – condenser; 5 – pump; 6 – heat exchanger

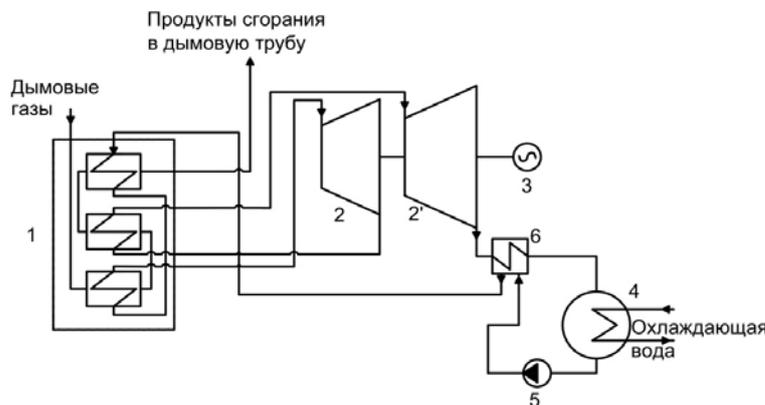


Рис. 2. Схема органического цикла Ренкина с промежуточным перегревом рабочего тела: 1 – котел-утилизатор; 2 – часть высокого давления турбины; 2' – часть низкого давления турбины; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

Fig. 2. The scheme of organic Rankine cycle with intermediate overheating of the working media: 1 – heat recovery boiler; 2 – high pressure part of the turbine; 2' – low pressure part of the turbine; 3 – generator; 4 – condenser; 5 – pump; 6 – heat exchanger

### Термодинамический анализ и результаты исследований

Согласно [16], наиболее подходящим методом термодинамического анализа ОЦР, а также циклов тригенерации в целом является эксергетический, позволяющий изучать качественную сторону преобразования энер-

гии и степень термодинамического совершенства процессов. Для решения данной задачи на языке программирования MATLAB разработана программа [17] по исследованию параметров рабочего тела перед турбиной, а также перед ЧВД и ЧНД турбины (в зависимости от выбранной схемы), при которых достигается максимальная эксергетическая эффективность установки.

Структура математической модели для проведения эксергетического анализа схем на ОЦР представлена на рис. 3. Методика эксергетического анализа разработана на основе [18–20] и описана в [21].

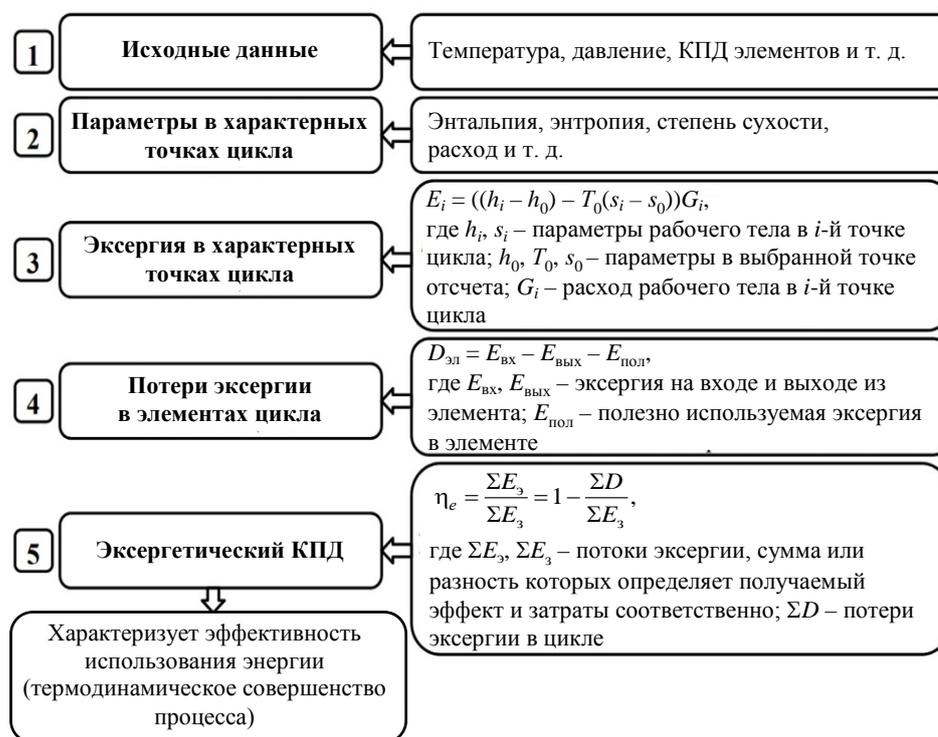


Рис. 3. Структура математической модели для проведения эксергетического анализа схем на органическом цикле Ренкина

Fig. 3. The structure of a mathematical model for the exergetic analysis of schemes on the organic Rankine cycle

При помощи предложенной методики для проведения эксергетического анализа и разработанной на ее основе программы определены максимальный эксергетический КПД и оптимальные с термодинамической точки зрения параметры, при которых он достигается, для тридцати НКРТ с нулевым потенциалом разрушения озонового слоя. Условия проведения исследований представлены в табл. 1. Исходя из цели термодинамической оптимизации считается, что при каждом изменении исследуемых параметров (температуры, давления) оборудование (турбогенератор, насос и т. д.) подбирается таким образом, чтобы его показатели эффективности оставались неизменными.

Таблица 1

Условия проведения исследований  
 Research conditions

Наименование параметра	Значение
Индикаторный КПД турбины, о. е.	0,82
Индикаторный КПД насоса, о. е.	0,80
КПД котла-утилизатора, о. е.	0,98
КПД теплообменного аппарата, о. е.	0,98
Механический КПД турбины, о. е.	0,98
КПД генератора, о. е.	0,97
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора, °C	25
Температура окружающей среды, °C	15
Атмосферное давление, кПа	101,33
Температура тепловых вторичных энергетических ресурсов (продуктов сгорания), поступающих в котел-утилизатор, °C	300
Максимально допустимая температура рабочего тела перед турбиной, °C	250
Максимально допустимая температура рабочего тела после промежуточного перегрева, °C	250
Максимально допустимое давление рабочего тела перед турбиной, МПа	20

Циклы исследуемых схем с оптимальными параметрами НКРТ представлены на рис. 4, 5. В качестве рабочего тела использован один из наиболее эффективных по результатам исследования хладагент R245FA, обладающий нулевым потенциалом разрушения озонового слоя и низким потенциалом глобального потепления.

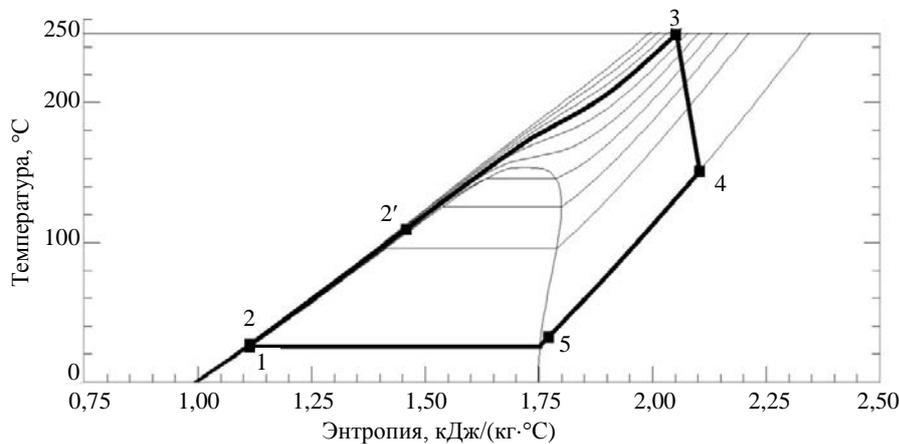


Рис. 4. Органический цикл Ренкина на перегретом паре в  $T-s$ -координатах

Fig. 4. Organic Rankine cycle on superheated steam in  $T-s$ -coordinates

Циклы состоят из следующих процессов: 1–2 – повышение давления НКРТ в насосе; 2–2' – нагрев НКРТ в теплообменном аппарате; 2'–3 – нагрев, парообразование и перегрев в котле-утилизаторе; 3–4 – рас-

ширение НКРТ в турбине; 3–3' – расширение в ЧВД турбины; 3'–3'' – перегрев НКРТ в промежуточном перегревателе котла-утилизатора; 3''–4 – расширение НКРТ в ЧНД турбины; 4–5 – охлаждение паров хладагента в теплообменнике; 5–1 – охлаждение и конденсация паров хладагента в конденсаторе.

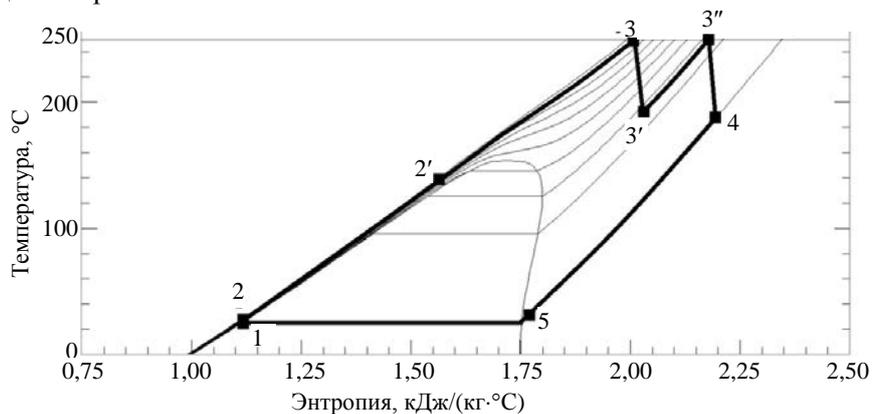


Рис. 5. Органический цикл Ренкина с промежуточным перегревом в  $T$ - $s$ -координатах

Fig. 5. Organic Rankine cycle with intermediate superheating in  $T$ - $s$ -coordinates

Результаты исследований представлены в табл. 2. Классификация рабочих тел по стоимости: с низкой (Н) стоимостью – не более 5 бел. руб./л, средней (С) – 5–15 бел. руб./л, высокой (В) – более 15 бел. руб./л. При этом средний расход хладагента на выработку 1 кВт·ч электроэнергии в ОЦР значительно (примерно в 10 раз) превосходит аналогичный расход водяного пара в классическом цикле Ренкина и зависит от теплофизических свойств НКРТ. Таким образом, при выборе рабочего тела необходимо обращать внимание не только на его эффективность, но и на стоимость.

Анализ полученных результатов показывает, что использование промежуточного перегрева в ОЦР приводит к повышению эксергетической эффективности цикла. В среднем прирост эксергетического КПД составляет 4,28 %, а для некоторых рабочих тел значительно превосходит данный результат (например, 8,14 и 6,56% для R717 и R32 соответственно), что обусловлено их теплофизическими свойствами. При этом погрешность, состоящая из погрешностей определения термодинамических свойств рабочих тел и оптимальных параметров (интерполяции), для всех НКРТ не превышает 2 % от полученного результата эксергетической эффективности (например, для R717 эксергетический КПД составляет  $39,89 \pm 0,80$  %).

Давление рабочего тела перед ЧВД турбины в схеме с промежуточным перегревом во всех случаях несколько выше, чем на перегретом паре.

Наибольшей термодинамической эффективностью при малых оптимальных давлениях рабочего тела обладают R600A и R245FA, а также новые синтезированные хладагенты, такие как R1234ZE(E), R1234YF, R1234ZE(Z), R1233ZD(E).

Таблица 2

Результаты исследований

The results of the research

Наименование рабочего тела	Стоимость	Турбоустановка								Прирост КПД, %
		на перегретом паре			с промежуточным перегревом					
		Параметр низкокипящего рабочего тела перед турбоустановкой		КПД, %	Параметр низкокипящего рабочего тела перед частью				КПД, %	
					высокого давления		низкого давления			
		$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}, \text{МПа}$	$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н}}, \text{МПа}$			
R125	C	250	13,32	46,16	250	16,88	250	5,90	49,72	3,56
R134A	C	250	10,38	46,98	250	14,67	250	4,33	51,37	4,39
R143A	C	250	11,95	46,51	250	15,26	250	5,42	50,78	4,27
R152A	C	250	9,02	46,58	250	13,10	250	3,35	51,80	5,22
R227EA	C	250	9,16	48,34	250	11,45	250	2,90	51,55	3,20
R23	C	250	16,64	40,59	250	20,20	250	10,33	44,18	3,59
R236FA	C	250	7,43	48,75	250	9,77	250	2,13	52,23	3,49
R245FA	C	250	5,98	50,01	250	8,15	250	1,89	53,74	3,74
R32	C	250	13,51	42,60	250	20,19	250	6,84	49,17	6,56
R1234YF	B	250	9,80	47,98	250	13,18	250	3,86	51,78	3,80
R1234ZE(E)	B	250	8,95	47,62	250	13,00	250	3,14	51,72	4,10
R1234ZE(Z)	B	250	5,51	49,42	250	7,68	250	1,88	53,75	4,33
R1233ZD(E)	B	250	4,92	49,93	250	6,63	250	1,64	54,01	4,08
R404A	C	250	12,38	46,38	250	16,75	250	5,72	50,42	4,03
R407A	C	250	12,91	45,07	250	18,25	250	6,02	49,64	4,58
R407B	C	250	13,28	45,58	250	18,32	250	6,14	49,67	4,09
R410A	C	250	14,14	44,68	250	18,66	250	6,60	49,68	5,00
R419A	C	250	12,34	45,80	250	16,61	250	5,54	49,74	3,93
R421A	C	250	12,24	46,01	250	16,55	250	5,43	49,97	3,96
R421B	C	250	12,98	46,07	250	16,53	250	5,76	49,78	3,71
R422A	C	250	12,90	46,22	250	16,78	250	5,79	49,85	3,63
R422B	C	250	12,16	46,15	250	16,56	250	5,44	50,05	3,91
R422B	C	250	12,16	46,15	250	16,56	250	5,44	50,05	3,91
R422C	C	250	12,84	46,19	250	16,75	250	5,75	49,86	3,67
R424A	C	250	11,97	46,13	250	16,51	250	5,36	50,09	3,96
R507A	C	250	12,49	46,40	250	16,78	250	5,77	50,39	3,99
R744	H	250	21,92	38,00	250	24,93	250	13,24	43,82	5,82
R717	H	250	13,00	39,89	250	19,50	250	5,31	48,03	8,14
R290	H	250	10,50	47,64	250	13,45	250	4,60	51,87	4,22
R600A	H	250	6,99	50,26	250	8,85	250	2,24	53,90	3,64

Для анализа влияния промежуточного перегрева на потери эксергии по элементам ТУ на ОЦР построены диаграммы Грассмана – Шаргута на примере хладагента R245FA (рис. 6, 7).

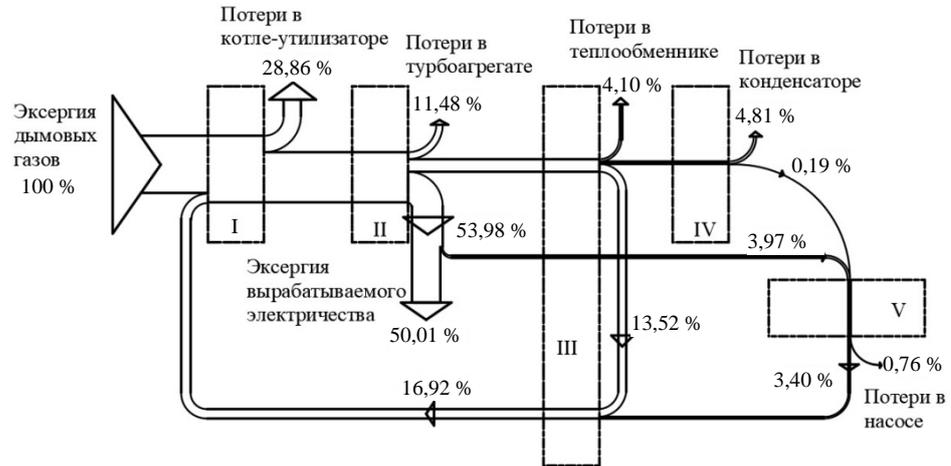


Рис. 6. Диаграмма Грассмана – Шаргута для схемы на перегретом паре:  
I – котел-утилизатор; II – турбоагрегат; III – теплообменный аппарат;  
IV – конденсатор; V – насос

Fig. 6. Grassman – Shargut chart for superheated steam circuit:  
I – heat recovery boiler; II – turbine unit; III – heat exchanger; IV – condenser; V – pump

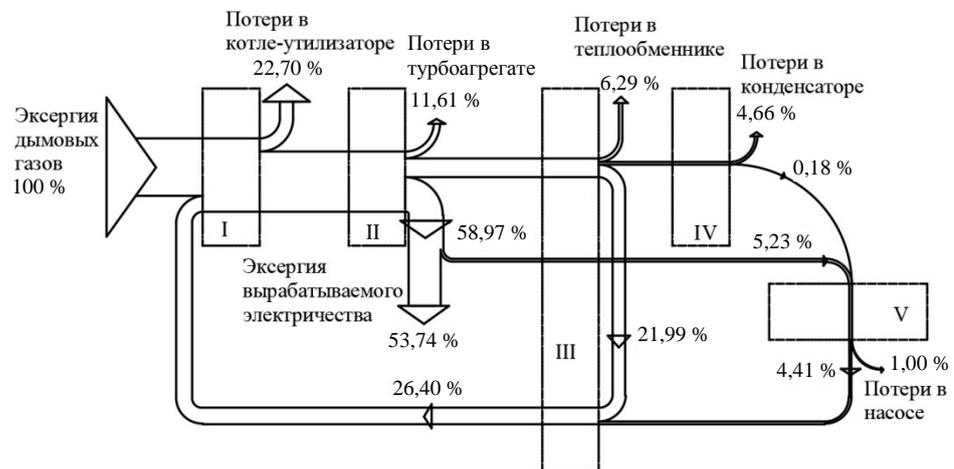


Рис. 7. Диаграмма Грассмана – Шаргута для схемы с промежуточным перегревом:  
I – котел-утилизатор; II – турбоагрегат; III – теплообменный аппарат;  
IV – конденсатор; V – насос

Fig. 7. Grassman – Shargut chart for a circuit with intermediate overheating:  
I – heat recovery boiler; II – turbine unit; III – heat exchanger; IV – condenser; V – pump

Промежуточный перегрев при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела перед ЧВД и ЧНД приводит к снижению потерь эксергии в котле-утилизаторе, значительному увеличению регенерации

в теплообменном аппарате, росту потерь эксергии в насосе (вследствие повышения давления рабочего тела перед турбиной), их перераспределению в турбоагрегате, теплообменном аппарате и конденсаторе (росту потерь эксергии в турбоагрегате и теплообменном аппарате в результате увеличения количества эксергии, поступающей и преобразовываемой в данных аппаратах, снижению потерь эксергии в конденсаторе из-за уменьшения количества рабочего тела, циркулирующего в цикле и, как следствие, поступающего в конденсатор).

Сравнительный анализ эксергетической эффективности сверхкритического ОЦР (табл. 2) и субкритического классического цикла Ренкина (табл. 3) при одинаковых условиях исследования (табл. 1) показывает, что эффективность ОЦР на сверхкритических параметрах значительно выше. Однако в зависимости от рабочего тела при одинаковых субкритических начальных и конечных параметрах (табл. 3) ОЦР может быть как эффективнее классического паротурбинного цикла (R290), так и обладать значительно меньшей эффективностью (R410A). При этом исследуемые методы (повышение давления и промежуточный перегрев) при температуре 250 °С для классического цикла Ренкина неприменимы, что ограничивает его возможности по повышению эффективности.

Таблица 3

**Результаты расчета эксергетической эффективности классического и органического циклов Ренкина на субкритических параметрах рабочего тела**

**The results of calculating the exergetic efficiency of the classical and organic Rankine cycles when parameters of the working media are the subcritical**

Наименование рабочего тела	Стоимость	Параметр рабочего тела		Эксергетический КПД, %
		Температура, °С	Давление, МПа	
Вода	Н	250	2,12	22,65
R410A	С	250	2,12	7,28
R290	Н	250	2,12	24,01

## ВЫВОДЫ

1. Применение органического цикла Ренкина актуально в альтернативной энергетике, для утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов, а также при сжигании топлив с низкой теплотворной способностью.

2. Одним из новых способов энергосбережения является комбинированное получение электроэнергии, теплоты и холода (тригенерация). В настоящее время турбоустановки на органическом цикле Ренкина рассматриваются в качестве элементов тригенерационных установок, что позволяет в рамках альтернативной энергетике синтезировать новые высокоэффективные схемы.

3. Наиболее подходящим методом термодинамического анализа органического цикла Ренкина, а также циклов тригенерации в целом явля-

ется эксергетический, позволяющий учитывать качественную сторону преобразования энергии и степень термодинамического совершенства процессов.

4. Для повышения термодинамической эффективности турбоустановок на органическом цикле Ренкина целесообразно применение промежуточного перегрева. Максимальная эффективность достигается при использовании оптимальных с термодинамической точки зрения параметров рабочего тела перед частями высокого и низкого давления турбины.

5. Положительный эффект от промежуточного перегрева в органическом цикле Ренкина зависит от используемого рабочего тела. Максимальный прирост эксергетического коэффициента полезного действия наблюдается у R717, R32 и составляет 8,14 и 6,56 % соответственно.

6. Результаты исследований, полученные для тридцати озонобезопасных низкокипящих рабочих тел, могут применяться при выборе рабочего тела для органического цикла Ренкина.

7. Сравнительный анализ классического и органического циклов Ренкина (рассмотренных при одинаковых начальных и конечных параметрах рабочего тела) показал, что органический цикл может быть как эффективнее классического паротурбинного (24,01 % для R290 против 22,65 % для воды), так и обладать значительно меньшей эффективностью (7,28 % для R410A против 22,65 % для воды). Эффективность органического цикла Ренкина на сверхкритических термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела значительно выше (достигает 50 % для R600A и R245FA), чем классического цикла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Применение турбодетандера в паросиловых установках для утилизации тепловой энергии в системах теплоснабжения / Р. А. Садыков [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 56–62. <https://doi.org/10.1134/S0040363616030115>.
2. Ключинский, В. П. Тригенерационные турбодетандерные установки на основе низкокипящих рабочих тел / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Беларусь в современном мире: материалы XII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 16–17 мая 2019 г. / под общ. ред. В. В. Кириенко. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. С. 329–331.
3. Technical, Economical and Market Review of Organic Rankine Cycles for the Conversion of Low-Grade Heat for Power Generation / F. Velez [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, Iss. 6. P. 4175–4189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>.
4. Белов, Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г. В. Белов, М. А. Дорохова // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 2. С. 99–124.
5. Techno-Economic Survey of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems / S. Quoilin [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P. 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>.
6. Генерация холода с применением детандер-генераторных агрегатов / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 37–44. <https://doi.org/10.1134/S0040363616050039>.
7. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 36–43. <https://doi.org/10.1134/S0040363616060047>.

8. Особенности комбинированного производства электроэнергии, тепла и холода на базе парогазовой установки / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 11–15. <https://doi.org/10.1134/S0040363615030042>.
  9. Овсянник, А. В. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник // Современные проблемы машиноведения: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., 22–23 нояб. 2018 г. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. С. 237–239.
  10. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2019. № 2. С. 41–51.
  11. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>.
  12. Trigenation Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainderand Recovery Boiler / A. V. Ovsyannik [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. No 042010.
  13. Щегляев, А. В. Теория теплового процесса и конструкции турбин: в 2 кн. Кн. 1 / 6-е изд., перераб. и подгот. к печати Б. М. Трояновским. М.: Энергоатомиздат, 1993. 384 с.
  14. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>.
  15. Ovsyannik, A. V. Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander / A. V. Ovsyannik, V. P. Kliuchinski // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. No 042005.
  16. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
  17. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2020. № 3–4. С. 108–115.
  18. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 295 с.
  19. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
  20. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 280 с.
  21. Овсянник А. В. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 65–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77>.
- Поступила 14.01.2021 Подписана в печать 25.03.2021 Опубликована онлайн 31.01.2022

## REFERENCES

1. Sadykov R. A., Daminov A. Z., Solomin I. N., Futin V. A. (2016) Use of a Turboexpander in Steam Power Units for Heat Energy Recovery in Heat Supply Systems. *Thermal Engineering*, 63 (5), 360–366. <https://doi.org/10.1134/S0040601516030113>.
2. Kliuchinski V. P., Ovsyannik A. V. (2019) Trigenation Turbo-Expander Units Based on Low-Boiling Working Fluids. *Belarus' v Sovremennom Mire: Materialy XII Mezhdunar. Nauch. Konf. Studentov, Magistrantov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh, Gornel', 16–17 Maya 2019 g.* [Belarus in the Modern World: Materials of the XII International Scientific Conference of Students, Undergraduates, Postgraduates and Young Scientists]. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel, 329–331 (in Russian).
3. Velez F., Segovia J. J., Martín M. C., Antolín G., Chejne F., Quijano A. (2012) Technical, Economical and Market Review of Organic Rankine Cycles for the Conversion of Low-Grade Heat for Power Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (6), 4175–4189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>.

4. Belov G. V., Dorokhova M. A. (2014) Renkin's Organic Cycle and its Application in Alternative Power Engineering. *Nauka i Obrazovanie: Nauch. Izd. MGTU im. N. E. Baumana = Science & Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, (2), 99–124 (in Russian).
5. Quoilin S., Van den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V. (2013) Techno-Economic Survey of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>
6. Klimenko A. V., Agababov V. S., Koryagin A. V., Baidakova Yu. O. (2016) Refrigeration Generation Using Expander-Generator Units. *Thermal Engineering*, 63 (5), 342–348. <https://doi.org/10.1134/S0040601516050037>.
7. Klimenko A. V., Agababov V. S., Il'ina I. P., Rozhnatovskii V. D., Burmakina A. V. (2016) Layouts of Trigenation Plants for Centralized Power Supply. *Thermal Engineering*, 63 (6), 414–421. <https://doi.org/10.1134/S0040601516060045>.
8. Klimenko A. V., Agababov V. S., Rogova A. A., Tideman P. A. (2015) Specific Features of Combined Generation of Electric Power, Heat, and Cold by Combined-Cycle Plants. *Thermal Engineering*, 62 (3), 166–170. <https://doi.org/10.1134/S0040601515030039>.
9. Ovsyannik A. V. (2018) Trigenation of Energy in Turbo-Expander Installations on Carbon Dioxide. *Sovremennye Problemy Mashinovedeniya: Materialy XII Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 22–23 Noyab. 2018 g.* [Modern Problems of Theoretical Engineering: Materials of the XII International Scientific Conference, 22–23 November, 2018]. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel, 237–239 (in Russian).
10. Ovsyannik A. V., Valchenko N. A., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I. (2019) Trigenation of Energy in Carbon Dioxide Turbo-Expander Plants. *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo = Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel*, (2), 41–51 (in Russian).
11. Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian).
12. Ovsyannik A. V., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I., Klyuchinski V. P. (2020) Trigenation Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainer and Recovery Boiler. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683, No 042010.
13. Shcheglyayev A. V. (1993) *Theory of Thermal Process and Turbine Design*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 384 (in Russian).
14. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562> (in Russian).
15. Ovsyannik, A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683, No 042005.
16. Grigoriev V. A., Zorin V. M. (1988) *Theoretical Foundations of Heat Engineering. Heat Engineering Experiment*. 2<sup>nd</sup> Ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 560 (in Russian).
17. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Development of a Computer Program for Optimizing the Parameters of a Low-Boiling Working Fluid in a Turbo-Expander Installation. *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo = Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel*, (3–4), 108–115 (in Russian).
18. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energiya Publ. 295 (in Russian).
19. Brodyanskii V. M. [et al.] (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
20. Szargut Y., Petela R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energiya Publ. 280 (in Russian).
21. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Turbo-Expander Units on Low Boiling Working Fluids. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 65–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-89-98>

УДК 697.2

## Исследование влияния схемы подключения алюминиевого радиатора марки STI на его теплотехнические характеристики

З. Г. Марьина<sup>1)</sup>, А. Ю. Верещагин<sup>1)</sup>, А. В. Новожилова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова  
(Архангельск, Российская Федерация)

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

**Реферат.** Алюминиевые радиаторы различных марок получили широкое распространение на рынке нагревательных приборов. Снизить затраты на изготовление радиаторов можно путем уменьшения поверхности теплоотдающих внутренних ребер. При этом сохраняется их внешний вид, а заявленная производителем теплоотдача остается достаточно высокой. Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2017 г. № 717 введена обязательная сертификация всех типов отопительных приборов. Отклонения указанной в паспорте прибора номинальной тепловой мощности секции от показателей, установленных по результатам испытаний, не должны превышать предельно допустимых значений (от –4 до +5 %). Как правило, ранее испытания производителем не проводились. Таким образом, изучение влияния схемы подключения радиатора с уменьшенной поверхностью ребер на его теплотехнические характеристики является актуальной задачей. В статье представлены результаты исследований заводского алюминиевого радиатора с уменьшенной поверхностью ребер марки STI Classic тепловой мощностью 1,92 кВт при расчетных условиях. В заданной теплоотдаче прибора не учитывается схема его подключения. Уменьшение внутренних и тыльных ребер снизило площадь его поверхности на 28,8 %. В результате проведенных экспериментов установлено, что тепловая мощность прибора ниже заявленной на 22 % при подключении сверху вниз и на 48 % – при подключении снизу вверх при расчетных условиях. В теплый период отопительного сезона при небольшой разности температур теплоносителя и воздуха в помещении средняя тепловая мощность радиатора совпадает с заявленным значением.

**Ключевые слова:** теплоотдача и тепловая мощность секции, тепловизионная съемка, теплоотдающая поверхность радиатора, направление движения теплоносителя

**Для цитирования:** Марьина, З. Г. Исследование влияния схемы подключения алюминиевого радиатора марки STI на его теплотехнические характеристики / З. Г. Марьина, А. Ю. Верещагин, А. В. Новожилова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 89–98. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-89-98>

---

### Адрес для переписки

Новожилова Анна Владимировна  
Северный (Арктический) федеральный  
университет имени М. В. Ломоносова  
наб. Северной Двины, 17,  
163000, г. Архангельск, Российская Федерация  
Тел.: +7 921 240-83-48  
a.novozhilova@narfu.ru

### Address for correspondence

Novozhilova Anna V.  
Northern (Arctic) Federal University  
named after M. V. Lomonosov  
17, Severnaya Dvina Emb.,  
163000, Arkhangelsk, Russian Federation  
Tel.: +7 921 240-83-48  
a.novozhilova@narfu.ru

---

## Study of the Influence of the Connection Mode of the STI Brand Aluminum Radiator on its Thermal Characteristics

Z. G. Mar'ina<sup>1)</sup>, A. Yu. Vereshchagin<sup>1)</sup>, A. V. Novozhilova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov  
(Arkhangelsk, Russian Federation)

**Abstract.** Aluminum radiators of various brands have become widespread on the market of heating equipment nowadays. It is possible to reduce the cost of manufacturing radiators by reducing the surface of the heat-emitting internal fins, while maintaining their appearance, and the heat transfer claimed by the manufacturer is being maintained high enough. Decree of the Government of the Russian Federation No 717 of June 17, 2017 introduced mandatory certification of all types of heating appliances. Deviations of the nominal thermal power of the section indicated in the device passport from the indicators established by the test results should not exceed the maximum permissible values (from  $-4$  to  $+5$  %). As a rule, no previous tests were carried out by the manufacturer. Thus, the study of the influence of the radiator connection mode with a reduced fin surface on its thermal characteristics is an urgent task. The article presents the results of the studies of a factory aluminum radiator with a reduced surface of STI Classic brand fins with a heat output of 1.92 kW under design conditions. The specified heat transfer of the device does not take into account its connection mode. The reduction of the inner and rear fins reduced its surface area by 28.8 %. As a result of the experiments carried out, it was found that the thermal power of the device is 22 % lower than the declared value when connected from top to bottom and 48 % lower when connected from bottom to top under design conditions. During the warmer period of the heating season, with a small temperature difference between the coolant and the indoor air, the average heat output of the radiator coincides with the declared value.

**Keywords:** heat transfer and heat output of the section, thermal imaging, heat transfer surface of the radiator, direction of movement of the heat carrier

**For citation:** Mar'ina Z. G., Vereshchagin A. Yu., Novozhilova A. V. (2022) Study of the Influence of the Connection Mode of the STI Brand Aluminum Radiator on its Thermal Characteristics. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 89–98. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-89-98> (in Russian)

### Введение

Наличие большого разнообразия нагревательных приборов привело к тому, что тепловые характеристики радиаторов, указанные производителем, не всегда совпадают с имеющимися на практике. Обзор многочисленных источников позволяет сделать вывод, что теплотехническими исследованиями подтверждаются данные только для отдельных типов радиаторов [1–8].

На российском рынке представлен широкий ассортимент современных нагревательных приборов, и немалая доля приходится на алюминиевые радиаторы. Их несомненным преимуществом является высокая теплоотдача, достигающая 200–210 Вт, при этом объем каждой из секций батареи составляет всего 450 мл при весе в 1,0–1,5 кг. Благодаря эстетичному внешнему виду подобные радиаторы можно внедрять в интерьер любого стиля. Низкая инерционность алюминиевых приборов отопления позволяет точно регулировать температурный режим при помощи термостатических устройств. Указанные достоинства, а также длительный срок службы и многообразие конструкций и типоразмеров алюминиевых радиаторов привели к их широкому распространению в России и за рубежом.

В статье рассмотрен 10-секционный алюминиевый радиатор типа STI Classic, предназначенный для систем отопления жилых, общественных и промышленных зданий. Технические характеристики прибора: рабочее давление 1,8 МПа; теплоотдача одной секции 192 Вт; максимальная температура теплоносителя 110 °С; емкость одной секции 0,29 л; межцентровое расстояние 500 мм; значение водородного показателя 7–8 рН. Ребра радиатора образуют вертикальные прямоугольные каналы, в которых воздух свободно движется снизу вверх, увеличивая теплоотдачу прибора при свободной конвекции.

Алюминий – дорогостоящий металл, поэтому понятно стремление производителя сократить его расход. Особенностью радиатора является сокращенная площадь теплоотдающей поверхности за счет обрезки внутренних и задних ребер (рис. 1). По заверению производителя, теплоотдача таких ребер снижается незначительно, а экономия металла существенна, что ведет к удешевлению радиатора. На практике заявленная тепловая мощность не достигается.



Рис. 1. Внешний вид радиатора

Fig. 1. The exterior appearance of the radiator

В настоящее время обязательная сертификация всех типов отопительных приборов и их соответствие ГОСТу [9] регламентируются постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2017 г. № 717 [10]. Отклонения номинального теплового потока, заявленного производителем, от показателей, установленных по результатам проведения испытаний, не должны превышать предельно допустимых значений (от –4 до +5 %) [9]. Таким образом, представляет интерес определение фактического теплового потока нагревательного прибора. Цель статьи – исследование тепловых характеристик нагревательного прибора марки STI Classic с уменьшенной поверхностью ребер [11].

В реальных однотрубных системах отопления с нижней разводкой и П-образными стояками на подъемном стояке радиаторы подключаются по схеме снизу вверх, а на опускном – сверху вниз. В представленной работе дополнительно определено влияние схемы подключения прибора на его теплоотдачу, поскольку в настоящее время при проектировании систем отопления производитель такой информации не дает.

### Схема экспериментальной установки

В лаборатории учебно-научного центра энергетических инноваций кафедры теплоэнергетики и теплотехники Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова собрана экспериментальная установка по исследованию теплотехнических характеристик алюминиевого радиатора марки STI (рис. 2). Водонагреватель 2 позволяет получать температуру теплоносителя до 80 °С. Циркуляция теплоносителя обеспечивается насосом 3. Тепловая нагрузка нагревательного прибора 1 определяется по показаниям расходомера 4 и двух хромель-копелевых термопар 9, 10. Термопары зачеканены в металлических подводках к прибору на входе и выходе из него и подключены через многопозиционный переключатель 7 к милливольтметру 8. Холодные спаи термопар погружены в сосуд Дьюара 6 с тающим льдом. Для улавливания загрязнений перед расходомером установлен сетчатый фильтр 5 [12].

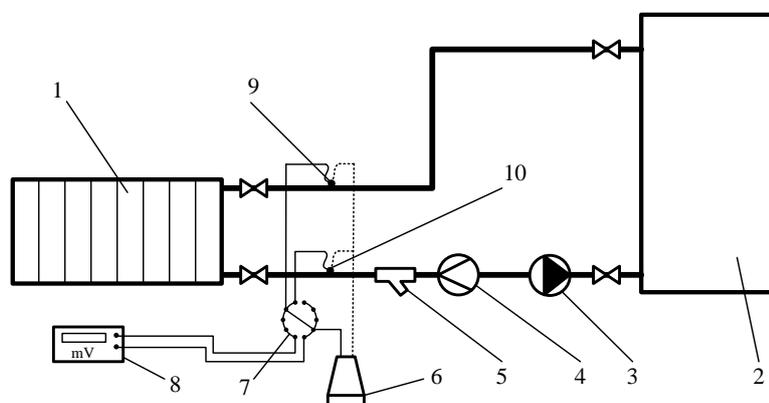


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по исследованию теплотехнических характеристик радиатора

Fig. 2. The scheme of the experimental installation for the study of thermal characteristics of the radiator

В стационарном тепловом режиме осуществляли замеры расхода теплоносителя, ЭДС термопар, установленных на входе и выходе из радиатора, и температуру воздуха в помещении. Опыты проводили в диапазоне температур греющего теплоносителя 40–80 °С при расходах 0,13–0,22 м<sup>3</sup>/ч. Тепловую нагрузку отопительного прибора определяли по расходу и разности температур теплоносителя. Равномерность температурного поля на внешней поверхности ребер и направление движения теплоносителя в приборе проверяли при помощи тепловизора TESTO-350.

### Исследование тепловых характеристик алюминиевого радиатора при подключении сверху вниз

Определим тепловую мощность 10-секционного радиатора STI Classic 500/80 с межцентровым расстоянием 500 мм и глубиной секции 80 мм при его одностороннем подключении сверху вниз.

В паспорте нагревательного прибора производителем заявлена тепловая мощность секции  $q_{\text{ном}} = 192$  Вт при расчетной разности средней темпера-

туры теплоносителя и температуры воздуха в помещении  $\Delta t_{cp} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  [10]. В России при проектировании двухтрубных систем отопления предполагают, что расчетные температуры теплоносителя до и после нагревательного прибора составляют 95 и 70  $^\circ\text{C}$  соответственно, температура воздуха в помещении 20  $^\circ\text{C}$ , расчетная разность температур  $\Delta t_{cp} = 62,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . В однотрубных системах температурный перепад 25  $^\circ\text{C}$  между подающим и обратным трубопроводами используется на цепочке последовательно включенных радиаторов, и расчетная разность температур зависит от места подключения прибора. Таким образом, тепловая мощность радиатора даже в расчетных условиях будет отличаться от номинального значения.

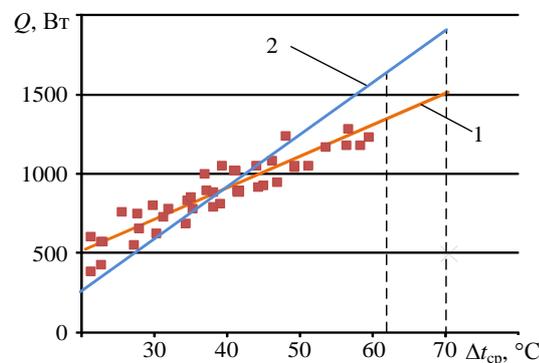
Производители предлагают в этом случае использовать поправочный коэффициент  $k = f(\Delta t_{cp})$ , учитывающий отличие расчетных условий от номинальных, и определять тепловой поток секции по формуле

$$q = q_{nom} k.$$

Заявленная производителем тепловая мощность  $Q$ , Вт, 10-секционного радиатора с учетом влияния расчетной разности температур показана линией 2 (рис. 3). Фактическая тепловая мощность, полученная экспериментально, представлена опытными точками (линия 1), что аппроксимируется уравнением:

$$Q = 20,4\Delta t_{cp} + 77,3.$$

Рис. 3. Тепловая мощность радиатора при подключении сверху вниз:  
 1 – экспериментальная;  
 2 – заявленная производителем  
 Fig. 3. Heat output of the radiator when connected from top to bottom:  
 1 – experimental;  
 2 – declared by manufacturer



Таким образом, наблюдаемый тепловой поток меньше паспортного значения на 22 % при расчетных условиях  $\Delta t_{cp} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  и на 19 % при  $\Delta t_{cp} = 62,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Следует отметить, что при качественном регулировании температуры теплоносителя в системах теплоснабжения, например, при среднеотопительной температуре наружного воздуха в г. Архангельске  $-4,5 \text{ }^\circ\text{C}$  расчетная разность средней температуры теплоносителя и температуры воздуха в помещении  $\Delta t_{cp} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для изучения направления движения теплоносителя в приборе, равномерности и времени прогрева радиатора проведена тепловизионная съемка прибором TESTO-350 с момента начала подачи теплоносителя и до полного прогрева радиатора. На термограммах видно, что сначала прогревается

верхний коллектор, а затем весь радиатор равномерно по длине и сверху вниз (рис. 4). Температура поверхности ребра по высоте отличается не более чем на 6 °С.

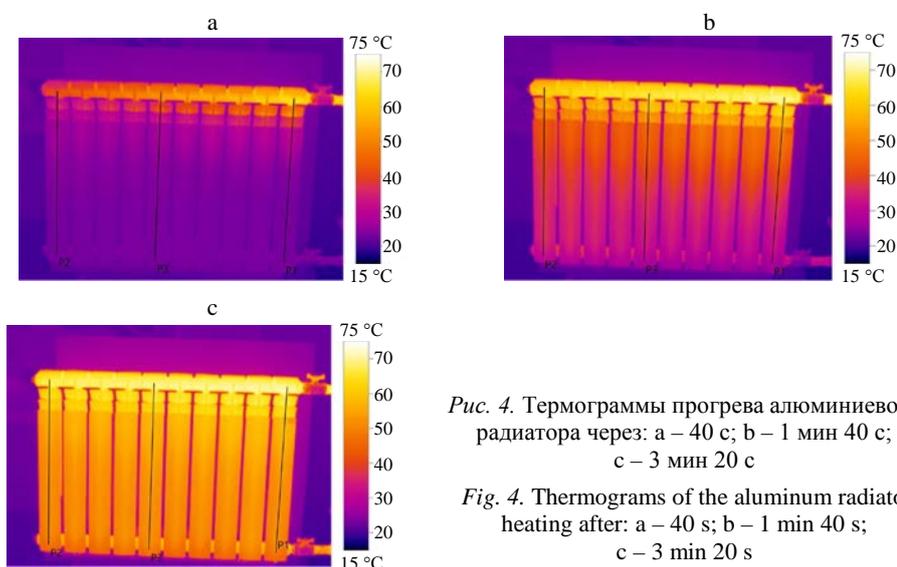


Рис. 4. Термограммы прогрева алюминиевого радиатора через: а – 40 с; б – 1 мин 40 с; с – 3 мин 20 с

Fig. 4. Thermograms of the aluminum radiator heating after: a – 40 s; b – 1 min 40 s; c – 3 min 20 s

После обработки данных тепловизионной съемки построен график изменения температуры поверхности ребер радиатора при прогреве крайних и центральной секций (рис. 5). Полный прогрев радиатора наблюдается за 3–4 мин, что свидетельствует о низкой инерционности прибора. В процессе прогрева температуры поверхностей секций радиатора отличаются не более чем на 5 °С, после прогрева температуры крайних секций ниже, чем центральной, на (2–3) °С. Таким образом, при подключении сверху вниз можно считать, что тепловая мощность каждой из секций примерно одинакова и не зависит от местоположения в приборе.

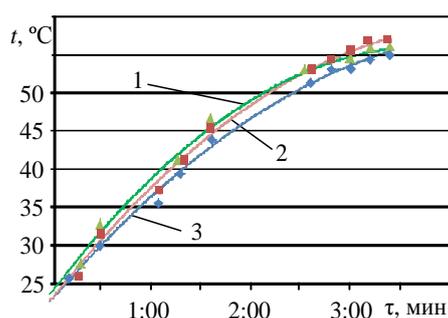


Рис. 5. Температура поверхности ребер алюминиевого радиатора: 1 – первой секции; 2 – центральной; 3 – конечной

Fig. 5. The temperature of the fin surface of the aluminum radiator sections: 1 – the first one; 2 – the central one; 3 – the final one

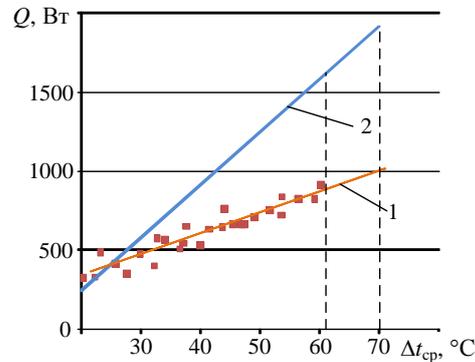
### Исследование тепловых характеристик алюминиевого радиатора при одностороннем подключении снизу вверх

Проведем аналогичные испытания 10-секционного радиатора STI Classic 500/80 при его одностороннем подключении снизу вверх.

Опытные точки, графически представленные линией 1 (рис. 6), аппроксимированы формулой

$$Q = 13,13\Delta t_{cp} + 84.$$

Рис. 6. Тепловая мощность радиатора при подключении снизу вверх:  
 1 – экспериментальная;  
 2 – заявленная производителем  
 Fig. 6. Heat output of the radiator when connected from the bottom up:  
 1 – experimental;  
 2 – declared by manufacturer



Наблюдаемый тепловой поток отличается от паспортного значения на 48 % при расчетных условиях  $\Delta t_{cp} = 70$  °C и на 46 % при  $\Delta t_{cp} = 62,5$  °C. При более низких значениях разности температур фактическая тепловая мощность будет также ниже расчетной. Выявлено влияние схемы подключения радиатора на его тепловую мощность: она снижается с 1500 Вт при подключении сверху вниз до 998 Вт при подключении снизу вверх, что составляет 33,5 %.

Тепловизионная съемка велась с интервалом 20 с с момента подачи горячего теплоносителя и до полного прогрева радиатора. Полученные результаты представлены на рис. 7, 8.

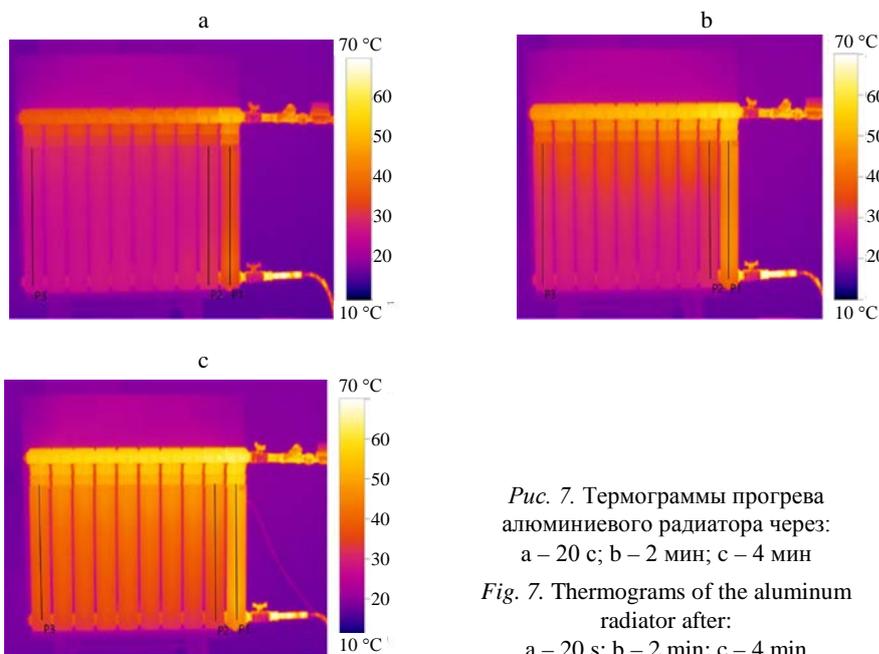


Рис. 7. Термограммы прогрева алюминиевого радиатора через:  
 а – 20 с; б – 2 мин; с – 4 мин  
 Fig. 7. Thermograms of the aluminum radiator after:  
 а – 20 s; б – 2 min; с – 4 min

Термограмма показывает движение теплоносителя в радиаторе. Сетевая вода, поступая снизу по первой секции, поднимается вверх и затем распределяется по секциям в верхнем коллекторе. В результате гравитационное давление воды направлено навстречу движению входящего теплоносителя. Это полностью согласуется со схемой движения, изложенной в [13]. Таким образом, имеем более низкую температуру поверхности ребер второй, третьей и последующих секций. На графике зависимости температуры от времени (рис. 8) отчетливо видно, что секция, находящаяся ближе всего к подводным трубопроводам, после разогрева радиатора в течение 4 мин имеет среднюю температуру поверхности 50,8 °С, следующая за ней секция прогревается до 41,5 °С, а остальные восемь секций – до 39,7 °С.

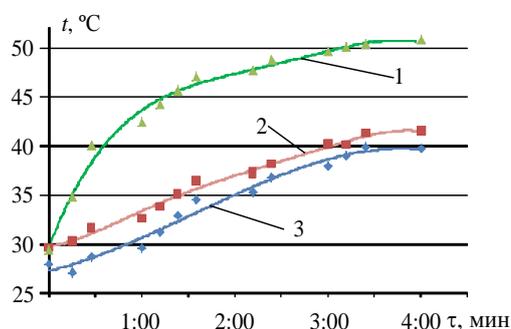


Рис. 8. Температура поверхности ребер алюминиевого радиатора:  
1 – первой секции; 2 – второй; 3 – третьей и последующих

Fig. 8. The temperature of the fin surface of the aluminum radiator sections:  
1 – the first; 2 – the second; 3 – the third and subsequent sections

Температура поверхности ребра первой секции в среднем на 11 °С, а второй на 9 °С выше температуры поверхности остальных секций. Тепловая мощность первой и второй секций отличается от остальных в среднем на 30 %. В данном случае следует вводить поправку на количество секций при определении тепловой мощности прибора.

### ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований впервые определено, что снижение площади поверхности ребер при обрезке составило 28,8 %.

2. При принятых условиях проектирования (расчетной разности средней температуры теплоносителя и температуры воздуха в помещении  $\Delta t_{\text{ср}} = 62,5$  °С) снижение тепловой мощности радиатора по сравнению с заявленной производителем составляет при подключении снизу вверх 46 %, при подключении сверху вниз – 19 %, что может привести к значительному недогреву помещений.

3. Впервые получены термограммы для алюминиевого радиатора STI Classic при различных схемах подключения. Показано изменение тем-

пературы и движения теплоносителя в процессе прогрева секций радиатора в зависимости от схемы подключения.

4. Производителю необходимо уточнить тепловую мощность секции и прибора в соответствии с [10], исходя из числа секций и схемы подключения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сравнение радиаторов отопления по теплоотдаче [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://otivent.com/sravnenie-radiatorov-otopleniya-po-teplootdache>.
2. Плохих, И. Радиаторы в низкотемпературных системах отопления [Электронный ресурс] / И. Плохих // *Аква-Терм*. 2011, № 2. Режим доступа: [https://aqua-therm.ru/articles/articles\\_185.html](https://aqua-therm.ru/articles/articles_185.html).
3. Embaye, M. Numerical Evaluation of Indoor Thermal Comfort and Energy Saving by Operating the Heating Panel Radiator at Different Flow Strategies / M. Embaye, R. K. AL-Dadah, S. Mahmoud // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 121. P. 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.042>.
4. An Investigation into the Effect of Decorative Covers on the Heat Output From LPHW Radiators / L. J. Brady [et al.] // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 133. P. 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.065>.
5. Maivel, M. Energy Performance of Radiators with Parallel and Serial Connected Panels / M. Maivel, M. Konzelmann, J. Kurnitski // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 86. P. 745–753. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.007>.
6. Gheibi, A. An Experimental and Numerical Investigation on Thermal Performance of a New Modified Baseboard Radiator / A. Gheibi, A. R. Rahmati // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 163. No 114324. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114324>.
7. Ioikova, I. L. Calculation of Heat Exchange on the Surface of a Flexible Heat Exchanger for Use in Mobile Hospitals / I. L. Ioikova, A. S. Kalinichenko // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 1. С. 81–88. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-81-88>.
8. Иоикова, И. Л. Исследование возможности применения вихревого теплогенератора в системах теплоснабжения жилых, промышленных и общественных зданий / И. Л. Иоикова, Е. Н. Тарасевич // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 159–166. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-159-166>.
9. Приборы отопительные. Общие технические условия: ГОСТ 31311–2005. М.: Стандартинформ, 2006.
10. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2009 г. № 982 [Электронный ресурс]: пост. Правительства Рос. Федерации от 17 июня 2017 г. № 717. Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=218692&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.8020253409431399#018911350397033821>.
11. Радиаторы отопления алюминиевые [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.royal-thermo.ru/catalog/radiator\\_otopleniya/alyuminievye\\_radiator](http://www.royal-thermo.ru/catalog/radiator_otopleniya/alyuminievye_radiator).
12. Vereshchagin, A. Yu. Thermal Performance of Aluminium Heating Appliance Research / A. Yu. Vereshchagin, N. V. Latishova // *Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2017: сб. материалов*. Архангельск: САФУ им. М. В. Ломоносова, 2017. С. 400–404.
13. Богословский, В. Н. Отопление / В. Н. Богословский, А. Н. Сканава. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.

## REFERENCES

1. *Comparison of Heating Radiators by Heat Transfer*. Available at: <https://otivent.com/sravnienie-radiatorov-otopeniya-po-teplootdache> (in Russian).
2. Plokhikh I. (2011) Radiators in Low-Temperature Heating Systems. *Akva-Term*, (2). Available at: [https://aqua-therm.ru/articles/articles\\_185.html](https://aqua-therm.ru/articles/articles_185.html) (in Russian).
3. Embaye M., AL-Dadah R. K., Mahmoud S. (2016) Numerical Evaluation of Indoor Thermal Comfort and Energy Saving by Operating the Heating Panel Radiator at Different Flow Strategies. *Energy and Buildings*, 121, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.042>.
4. Brady L. J., Abdellatif M., Cullen J., Maddocks J., Al-Shamma'a A. (2016) An Investigation into the Effect of Decorative Covers on the Heat Output From LPHW Radiators. *Energy and Buildings*, 133, 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.065>.
5. Maivel M., Konzelmann M., Kurnitski J. (2015) Energy Performance of Radiators with Parallel and Serial Connected Panels. *Energy and Buildings*, 86, 745–753. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.007>.
6. Gheibi A., Rahmati A. R. (2019) An Experimental and Numerical Investigation on Thermal Performance of a New Modified Baseboard Radiator. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114324. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114324>.
7. Iokova I. L., Kalinichenko A. S. (2020) Calculation of Heat Exchange on the Surface of a Flexible Heat Exchanger for Use in Mobile Hospitals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 81–88. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-81-88>.
8. Iokova I. L., Tarasevich E. N. (2018) Investigation of the Possibility of Using a Vortex Heat Generator in Heat Supply Systems for Residential, Industrial and Public Buildings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 159–166. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-159-166> (in Russian).
9. State Standart 31311–2005. *Heating Devices. General Technical Conditions*. Moscow, Standartinform Publ. 2006 (in Russian).
10. On Amendments to the Decree of the Government of the Russian Federation of December 1, 2009 No 982: Resolution of the Government of the Russian Federation No 717 of June 17, 2017. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=218692&fld=134&dst=100000001,0&rnd=0.8020253409431399#018911350397033821> (in Russian).
11. *Aluminum Radiators*. Available at: [http://www.royal-thermo.ru/catalog/radiatory\\_otopeniya/alyuminievye\\_radiatory](http://www.royal-thermo.ru/catalog/radiatory_otopeniya/alyuminievye_radiatory) (in Russian).
12. Vereshchagin A. Yu., Latishova N. V. (2017) Thermal Performance of Aluminium Heating Appliance Research. *Lomonosovskie Nauchnye Chteniya Studentov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh – 2017: Sb. Materialov* [Lomonosov Scientific Readings of Students, Postgraduates and Young Scientists – 2017: Collection of Conference Materials]. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, 400–404 (in Russian).
13. Bogoslovsky V. N., Skanavi A. N. A. (1991) *Heating*. Moscow, Stroyizdat Publ. 735 (in Russian).