

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ
ЭНЕРГЕТИКА Том 68, № 1
2025

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю.** Коррекция амплитудной и фазовой погрешностей сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты при изменении частоты 5
- Секретарев Ю. А., Горшунов А. А.** Модели текущего технического состояния электрооборудования для расчета надежности систем электроснабжения монопотребителей в рамках риск-ориентированного подхода 17
- Олейников А. М., Канов Л. Н.** Определение мест повреждения изоляции неоднородной линии электроснабжения 35
- Вельченко А. А., Павлюковец С. А., Радкевич А. А., Ибрагим А. К.** Энергоэффективное нейросетевое управление бесколлекторным двигателем постоянного тока 45

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Сафаров Ж. Э., Султанова Ш. А., Гунеш Г., Понасенко А. С., Самандаров Д. И., Пулатов М. М., Миркомиллов А. М., Насирова М. А.** Исследование эффективного коэффициента диффузии и энергии активации с целью энергосбережения при конвекционной сушке 58
- Игнатович Р. С.** Принципы организации и функционирования мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях водородной энергетики 76

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

- К. В. ДОБРЕГО* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
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),
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),
Ф. А. РОМАНЮК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
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 научный редактор В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 марта 2024 г.
Регистрационный номер 1257

Подписано к печати 31.01.2025. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. 8,32. Тираж экз.
Дата выхода в свет . 2024. 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; <http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2025

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 68, No 1
2025

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Belarusian National Technical University

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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. Correction of Amplitude and Phase Errors of the Signal in Microprocessor Automation and Relay Protection Systems when Frequency Changes	5
Sekretarev Y. A., Gorshunov A. A. Models of the Current Technical Condition of Electrical Equipment for Calculating the Reliability of Power Supply Systems for Single-Users within the Framework of a Risk-Based Approach	17
Oleynikov A. M., Kanov L. N. Determination of Insulation Fault Locations in a Heterogeneous Power Supply Line	35
Velchenko A. A., Pauliukavets S. A., Radkevich A. A., Ibrahim A. K. Energy Efficient Neural Network Control of a Brushless DC Motor	45

HEAT POWER ENGINEERING

Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Gunes G., Ponasenko A. S., Samandarov D. I., Pulatov M. M., Mirkomilov A. M., Nasirova M. A. Research of the Effective Diffusion Coefficient and Activation Energy for the Purpose of Energy Saving during Convection Drying	58
Ignatovich R. S. Principles of Organization and Functioning of Mini-CHP Plants Using Local Fuels in Conditions of Hydrogen Energy	76

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

- K. V. DOBREGO* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
- 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),
- 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),
- F. A. ROMANIUK* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- V. Yu. RUMIANTSEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- A.-S. S. SAUHATAS* (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
- V. S. SEVERYANIN* (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
- V. A. SEDNIN* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- B. S. SOROKA* (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),
- V. A. STROEV* (National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation),
- E. V. TOROPOV* (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
- G. N. UZAKOV* (Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan),
- B. M. KHROUSTALEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- L. V. SHENETS* (RUE “Belinvestenergosberezhenie”, Minsk, Republic of Belarus)

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2024, March, 19th
Reg. No 1257**

Passed for printing 31.01.2025. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,0.
An edition of 35 copies. Date of publishing 2024. 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; <http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP 3820000006896 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-5-16>

УДК 621.316.925

Коррекция амплитудной и фазовой погрешностей сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты при изменении частоты

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

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

Реферат. В микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты в качестве контролируемых параметров электрических величин достаточно широко используются амплитудные (действующие) значения и фазовые сдвиги входных сигналов. Они в большинстве случаев определяются по выборкам одной или двух ортогональных составляющих основной гармоники названных сигналов. В существующих микропроцессорных системах для их формирования преимущественно применяются нерекурсивные цифровые фильтры Фурье. При номинальной частоте в энергосистеме выделенные указанными фильтрами ортогональные составляющие не вносят дополнительных погрешностей в определяемые по ним амплитуды и фазовые сдвиги. В режимах с отклонением частоты от номинального значения количество выборок входного сигнала за период становится дробным числом, и дискретизация превращается в асинхронную. По этой причине в амплитуде и фазе сигнала появляются соответствующие погрешности. Основным вопросом их коррекции является непосредственная или косвенная оценка частоты. В настоящей статье реализуется косвенная оценка мгновенной частоты по динамическому косинусу угла одной выборки, который вычисляется по трем смежным мгновенным значениям косинусной ортогональной составляющей сигнала. Использование информации о мгновенной частоте при определении амплитуд и фазовых сдвигов позволяет осуществить полноценную коррекцию соответствующих погрешностей. При этом следует отметить, что в переходных режимах из-за влияния различных факторов динамический косинус определяется с большими погрешностями. Это делает нецелесообразной коррекцию амплитудной и фазовой погрешностей в указанных режимах, ограничивая ее использование только установившимися режимами. Для указанных режимов предложен и исследован функциональный алгоритм коррекции амплитудной и фазовой погрешностей сигналов в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты при отклонении частоты от номинальной. Результаты выполненных исследований показали, что разработанный алгоритм коррекции обеспечивает практически полное исключение проявления амплитудной и фазовой погрешностей в установившихся режимах в диапазоне изменения частоты 47–52 Гц.

Ключевые слова: микропроцессорные системы автоматизации и релейной защиты, амплитудная и фазовая погрешности, мгновенная частота, модель, тестовое воздействие, вычислительный эксперимент, MATLAB – Simulink, результаты исследований

Для цитирования: Романюк, Ф. А. Коррекция амплитудной и фазовой погрешностей сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты при изменении частоты / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 5–16. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-5-16>

Адрес для переписки

Румянцев Владимир Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

Address for correspondence

Rumiantsev Vladimir Yu.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

Correction of Amplitude and Phase Errors of the Signal in Microprocessor Automation and Relay Protection Systems when Frequency Changes

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

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

Abstract. In microprocessor automation and relay protection systems, amplitude (effective) values and phase shifts of input signals are widely used as controlled parameters of electrical quantities. In most cases, they are determined by samples of one or two orthogonal components of the main harmony of these signals. In existing microprocessor systems, non-recursive digital Fourier filters are mainly used to form them. At a nominal frequency in the power system, the orthogonal components highlighted by these filters do not introduce additional errors into the amplitudes and phase shifts determined by them. In modes with frequency deviation from the nominal value, the number of input signal samples per period becomes a fractional number, and sampling turns into asynchronous one. For this reason, corresponding errors appear in the amplitude and phase of the signal. The main issue of their correction is the direct or indirect estimation of frequency. In this article, an indirect estimation of the instantaneous frequency is realized by the dynamic cosine of the angle of one sample, which is calculated from three adjacent numerical values of the cosine orthogonal component of the signal. The use of instantaneous frequency information in determining amplitudes and phase shifts allows for full correction of the corresponding errors. It should be noted, however, that in transient modes, due to the influence of various factors, the dynamic cosine is determined with large errors. This makes it impractical to correct amplitude and phase errors in these modes, limiting its use only to steady-state modes. For these modes, a functional algorithm for correcting the amplitude and phase errors of signals in microprocessor automation and relay protection systems when the frequency deviates from the nominal one is proposed and investigated. The results of the performed investigations showed that the developed correction algorithm provides almost complete elimination of the manifestation of amplitude and phase errors in steady-state modes in the frequency range of 47–52 Hz.

Keywords: microprocessor automation and relay protection systems, amplitude and phase errors, instantaneous frequency, model, test effect, computational experiment, MATLAB – Simulink, research results

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2025) Correction of Amplitude and Phase Errors of the Signal in Microprocessor Automation and Relay Protection Systems when Frequency Changes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (1), 5–16. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-5-16> (in Russian)

Введение

В микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты в качестве контролируемых параметров электрических величин достаточно широко используются амплитудные (действующие) значения и фазовые сдвиги входных сигналов, а также параметры других величин, от них зависящие [1]. Они в большинстве случаев определяются по выборкам одной или двух ортогональных составляющих основной гармоники (ОС) указанных сигналов [2]. В существующих микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты для формирования ОС преимущественно применяются классические нерекурсивные цифровые фильтры (ЦФ) Фурье и различные их модификации [3].

При номинальной частоте в энергосистеме выделенные указанными ЦФ ортогональные составляющие не вносят дополнительных погрешностей в определяемые по ним амплитуды и фазовые сдвиги. В режимах с откло-

нением частоты от номинального значения количество выборок входного сигнала за период становится дробным числом и дискретизация превращается в асинхронную [4]. По этой причине в амплитуде и фазе сигнала появляются соответствующие погрешности.

Амплитудная погрешность проявляется в возникновении колебаний полученных амплитудных значений сигнала с удвоенной частотой. Ее оценка и основные решения по предотвращению изменений амплитуды при уходе частоты от номинальной рассмотрены в [5, 6].

На рис. 1 показана оценка разности фаз между выходным и входным сигналами нерекурсивного ЦФ Фурье с частотой дискретизации 1200 Гц в установившемся режиме. При отклонении частоты от номинальной 50 Гц в пределах ± 5 Гц разность фаз $\Delta\varphi$ изменяется в диапазоне $\pm 18^\circ$ (рис. 1). Изменение $\Delta\varphi$ во временной области имеет колебательный характер с удвоенной частотой.

Из приведенной на рис. 1 зависимости следует, что возникающие в нормальном режиме незначительные погрешности фазы из-за небольших колебаний частоты не являются проблемными и могут не учитываться.

Коррекция фазовой погрешности необходима при значительных изменениях частоты, возникновение которых возможно в слабых энергосистемах.

Следует отметить, что если необходима коррекция и амплитудной и фазовой погрешностей, то ее целесообразно осуществлять комплексно на базе единого алгоритма. Его основой является оценка частоты [4].

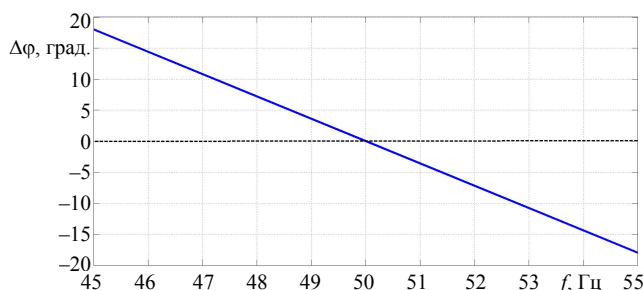


Рис. 1. Погрешность определения разности фаз между выходным и входным сигналами, обусловленная отклонением частоты от номинальной, для нерекурсивного цифрового фильтра Фурье с частотой дискретизации 1200 Гц

Fig. 1. Error in determining the phase difference between the output and input signals due to frequency deviation from the nominal frequency for a non-recursive digital Fourier filter with a sampling frequency of 1200 Hz

Основная часть

Для осуществления коррекции амплитудной и фазовой погрешностей сигнала может использоваться непосредственная или косвенная оценка частоты. Наиболее подходящей для решения данной проблемы представляется мгновенная частота, которая является не постоянной величиной, а функцией времени. Ее измерение представляет весьма сложную задачу.

Алгоритмы оценки мгновенной частоты могут давать неприемлемые результаты из-за колебаний амплитуды и фазы сигнала, а также в силу других причин, что особенно характерно для переходных режимов.

В настоящем исследовании реализована косвенная оценка мгновенной частоты по динамическому косинусу угла одной выборки сигнала.

Основу предлагаемого алгоритма коррекции амплитудной и фазовой погрешностей составляет выполнение следующих вычислительных операций [5]. С помощью косинусного ЦФ Фурье путем обработки входного сигнала $x(t)$ формируются выборки одноименной ОС основной частоты

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

где N – число выборок сигнала за период; n – номер выборки; a_{cn} – коэффициенты косинусного ЦФ.

Вычисляется динамический косинус угла одной выборки по трем последовательным значениям косинусной ОС ($x_{c(n-2)}$, $x_{c(n-1)}$, x_{cn}) [7]

$$\cos(\omega \Delta t)_n = \frac{x_{cn} + x_{c(n-2)}}{2x_{c(n-1)}}. \quad (2)$$

Когда на текущем шаге n значение $x_{c(n-1)}$ близко к нулю, о чем свидетельствует выполнение условия $\frac{|x_{c(n-1)}|}{X_{m(n-1)*}} < x_{*min}$, где $X_{m(n-1)*}$ – амплитуда сигнала на предыдущем шаге; x_{*min} – относительное минимально допускаемое значение выборки сигнала, то $\cos(\omega_n \Delta t)$ присваивается значение с предыдущего шага. Для отстройки от случайных воздействий и других возможных выбросов $\cos(\omega_n \Delta t)$ ограничивается диапазоном, граничные значения которого соответствуют частотам 45 и 52 Гц. Если частота сигнала находится за пределами указанного диапазона, то коррекция амплитудной и фазовой погрешностей не производится.

Далее вычисляется динамический синус угла одной выборки

$$\sin(\omega_n \Delta t)_n = \sqrt{1 - \cos^2(\omega_n \Delta t)_n}. \quad (3)$$

По смежным выборкам косинусной ОС $x_{c(n-1)}$ и x_{cn} с использованием динамических косинуса и синуса формируются расчетные выборки синусной ОС

$$x_{psn} = \frac{x_{c(n-1)} - x_{cn} \cos(\omega_n \Delta t)}{\sin(\omega_n \Delta t)}. \quad (4)$$

Независимая от изменений частоты амплитуда X_{mn} вычисляется по выборкам x_{cn} и x_{psn}

$$X_{mn} = \sqrt{x_{psn}^2 + x_{cn}^2}. \quad (5)$$

Следует отметить, что выполнение вышеперечисленных операций обеспечивает коррекцию амплитудной погрешности при изменении частоты сигнала в заданном диапазоне с такими же показателями в частотной области, как и алгоритм, рассмотренный в [5].

Для коррекции фазовой погрешности сигнала дополнительно реализуются следующие операции. Вычисляется относительное значение частоты (по отношению к номинальной 50 Гц) по выражению

$$f_{*n} = \frac{10,3366 - 10 \cos(\omega_n \Delta t)}{0,67734}. \quad (6)$$

В основу (6) положено представление зависимости $f_n(\cos \omega_n \Delta t)$ применительно к ЦФ Фурье с частотой дискретизации 1200 Гц в диапазоне частот 45–55 Гц уравнением прямой, что вполне обосновано и приемлемо.

Следует отметить, что в переходных режимах из-за влияния различных факторов f_{*n} может определяться с большими погрешностями. Это делает коррекцию фазовой погрешности в указанных режимах нецелесообразной, она исключается заданием $f_{*n} = 1$.

Режим входного сигнала фиксируется по значению так называемого корректирующего коэффициента, равного в установившемся режиме входного сигнала единице. Методика его определения подробно изложена в [8, 9].

Затем рассчитывается угол коррекции $\Delta\varphi_n$ по приведенному ниже выражению, которое получено в результате аппроксимации представленной на рис. 1 зависимости

$$\Delta\varphi_n = \pi(1 - f_{*n}), \quad (7)$$

после чего вычисляются его синус S_n и косинус C_n :

$$S_n = \sin \Delta\varphi_n; \quad C_n = \cos \Delta\varphi_n. \quad (8)$$

На заключительном этапе коррекции формируются результирующие ОС с минимальными амплитудной и фазовой погрешностями:

$$\begin{aligned} y_{sn} &= x_{psn} C_n - x_{cn} S_n; \\ y_{cn} &= x_{cn} C_n + x_{psn} S_n. \end{aligned} \quad (9)$$

Организация и проведение вычислительного эксперимента

Оценка эффективности предлагаемого метода формирования ОС входных сигналов с коррекцией амплитудной и фазовой погрешностей проводилась с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB – Simulink [10].

В указанную структуру входят модели: источника входного сигнала, цифрового фильтра Фурье (ЦФФ), цифрового фильтра (ЦФ), определяющего амплитуду входного сигнала, цифрового фильтра с коррекцией амплитудной и фазовой погрешностей (ЦФК), а также библиотечные блоки Simulink, обеспечивающие визуализацию полученных результатов.

На рис. 2 приведена укрупненная структура модели. Она содержит семь подсистем, в каждой из которых выполняются рассмотренные выше операции, и состоит из стандартных блоков библиотеки MATLAB – Simulink. Выходные порты подсистем на рис. 2 имеют такие же обозначения сигналов, как в математических выражениях, используемых в настоящей работе.

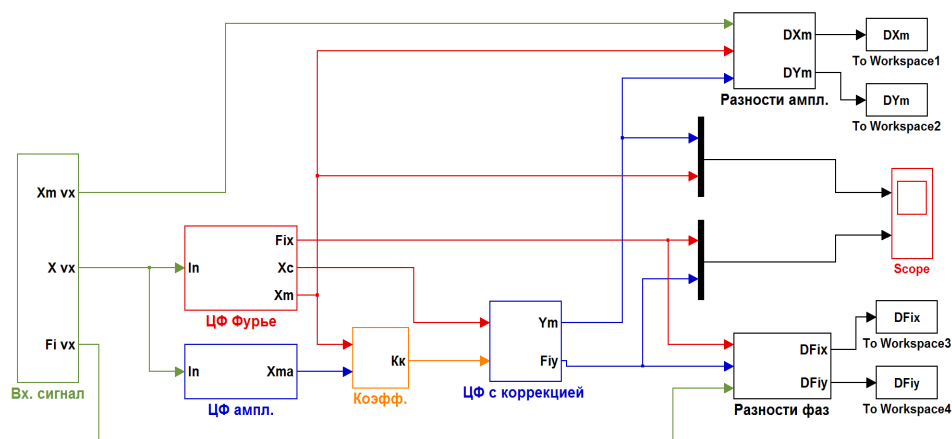


Рис. 2. Структура модели ЦФ с коррекцией амплитудной и фазовой погрешностей

Fig. 2. Structure of the DF model with correction of amplitude and phase errors

Тестовое воздействие на систему формируется в блоке «Вх. сигнал» и позволяет воспроизводить рабочий, аварийный и послеаварийный режимы в форме идеального синусоидального сигнала с возможностью изменения в каждом из перечисленных режимов амплитуд, фазовых сдвигов и частот. Входной сигнал одновременно является синусной ОС. Косинусная ОС получается из синусной ОС путем ее сдвига на 90° . По указанному ОС в соответствии с известными выражениями [12] вычисляются амплитуда X_{mvx} и фаза φ_{vx} входного сигнала. С этими информационными параметрами, принятыми в качестве идеальных, на различных этапах исследования сравниваются соответствующие параметры сигналов, формируемые цифровыми фильтрами [12].

В подсистеме «ЦФ Фурье» по выражению (1) определяются косинусная x_{cn} ОС, а также амплитуда X_m и фаза φ_x основной гармоники входного сигнала x_{vx} .

Амплитуда входного сигнала X_{ma} вычисляется в подсистеме «ЦФ ампл.» согласно [8].

В подсистеме «Козф.» по отношению амплитуд X_{ma} и X_m , полученных в предыдущих блоках, формируется текущее значение корректирующего

коэффициента k_k , необходимого для фиксации входного режима (в установившемся режиме $k_k = 1$, а в переходном $k_k > 1$).

Предлагаемый ЦФК реализован на основе выражений (2)–(9) в подсистеме «ЦФ с коррекцией».

Результаты исследований в виде графиков в функции времени выводятся на осциллограф Scope. Для получения зависимостей $y = f(x)$, а также графиков в полярных координатах и некоторых других зависимостей в блоках «Разности амплитуд» и «Разности фаз» формируются соответствующие разности сигналов:

$$\Delta X_m = X_{mvx} - X_m; \quad \Delta Y_m = X_{mvx} - Y_m;$$

$$\Delta \varphi_x = \varphi_{vx} - \varphi_x; \quad \Delta \varphi_y = \varphi_{vx} - \varphi_y,$$

где X_{mvx} , X_m , Y_m – соответственно амплитуда входного сигнала, амплитуда сигнала на выходе ЦФ Фурье и на выходе ЦФ с компенсацией; φ_{vx} , φ_x , φ_y – фазы указанных сигналов.

Указанные разностные сигналы с помощью блоков To Workspace передаются в рабочую область MATLAB для дальнейшего использования [13].

Результаты исследования

Все информационные параметры, полученные в результате моделирования разработанного ЦФК, сравнивались с аналогичными параметрами ЦФФ, принятого за эталонный. Выбор ЦФ Фурье в качестве эталона для сравнения обусловлен тем, что на его основе строится большинство измерительных органов, используемых в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты. Необходимо отметить, что и предлагаемый в настоящей работе ЦФК также основан на использовании дискретного преобразования Фурье. Он отличается от эталонного улучшенными характеристиками только в режимах работы, сопровождающихся отклонением частоты от номинальной, а во всех остальных режимах ведет себя подобно ЦФФ.

На рис. 3 показаны в относительных единицах амплитуды сигналов на выходах ЦФФ X_m (кривая 2) и ЦФК Y_m (кривая 1) при синусоидальном входном воздействии. В нормальном режиме $X_m = Y_m = 1$. В момент времени $t = 0,14$ с происходит короткое замыкание (КЗ) с амплитудой, в 10 раз превышающей амплитуду сигнала в нормальном режиме. При этом режим КЗ дополнительно сопровождается снижением частоты до 48 Гц. Переходный процесс КЗ длится 1 период, и по его завершении наступает установившийся режим КЗ. В этом режиме на выходе ЦФФ наблюдаются колебания с размахом 9,77–10,18 о. е. и частотой, близкой к удвоенной частоте контролируемого сигнала. У предлагаемого ЦФК колебания амплитуды отсутствуют и ее значение устанавливается на уровне 10,17 о. е., т. е. амплитудная погрешность составляет 1,7 %. В этой связи использова-

ние ЦФК для получения амплитуды сигнала при КЗ со снижением частоты представляет определенный практический интерес.

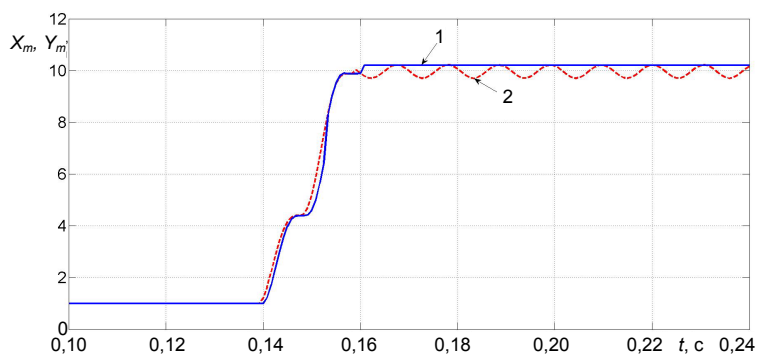


Рис. 3. Амплитуды выходных сигналов: 1 – цифровой фильтр с коррекцией; 2 – цифровой фильтр Фурье

Fig. 3. Amplitudes of output signals: 1 – of digital filter with correction; 2 – of digital Fourier filter

На рис. 4а и 4б представлены графики $(\varphi_{vx}, \Delta X_m)$ и $(\varphi_{vy}, \Delta Y_m)$ в полярной системе координат [14] для установившегося режима КЗ при снижении частоты до 48 Гц. Диапазон колебаний амплитуды у ЦФФ $X_m = 9,77\text{--}10,18$ о. е., что по отношению к входному сигналу $X_{mvx} = 10$ о. е. составляет $\Delta X_m = 0,18\text{--}0,23$ о. е. На рис. 4а этому изменению отвечают траектории рабочей точки в форме «лепестков»: горизонтальная пара соответствует отрицательному относительному максимуму, а вертикальная пара – положительному. У ЦФК колебания амплитуды в переходном режиме отсутствуют, что представляется в полярных координатах окружностью (рис. 4б) радиусом $\Delta Y_m = 0,17$ о. е.

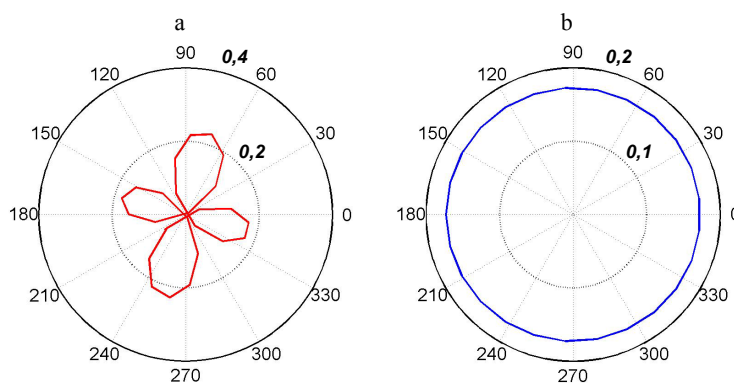


Рис. 4. Амплитудные погрешности: а – цифрового фильтра Фурье; б – цифрового фильтра с коррекцией амплитудной и фазовой погрешностей

Fig. 4. Amplitude errors: а – of digital Fourier filter; б – of digital filter with correction of amplitude and phase errors

На рис. 5 представлены изменения фаз сигналов во времени. В нормальном режиме фазы выходных сигналов ЦФК φ_y (кривая 1) и ЦФФ φ_x

(кривая 2) совпадают и изменяются так же, как текущая фаза идеального входного сигнала $\varphi_{\text{вх}}$ (кривая 3). В момент времени $t = 0,14$ с возникает аварийный режим, который можно рассматривать как КЗ с падением частоты до 48 Гц. В первый период после КЗ фазы φ_x , φ_y существенно отличаются от фазы входного сигнала $\varphi_{\text{вх}}$, оставаясь близкими между собой по величине и форме. В установившемся режиме КЗ текущие фазы ЦФ изменяются по-разному – фаза ЦФК φ_y совпадает с фазой идеального сигнала, а фазы ЦФФ φ_x и идеального – отличаются.

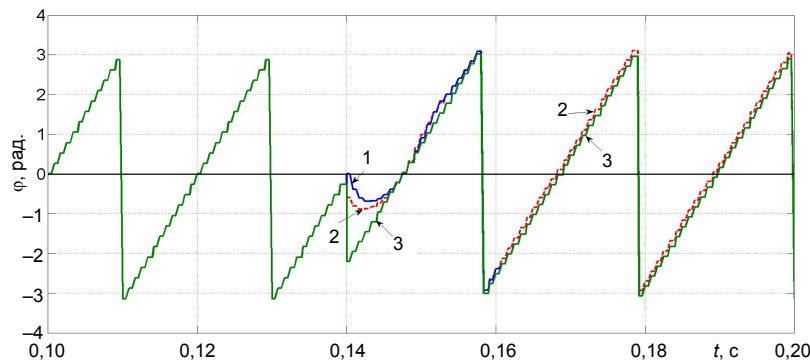


Рис. 5. Изменение фаз во времени: 1 – цифрового фильтра с коррекцией амплитудной и фазовой погрешностей – φ_y ; 2 – цифрового фильтра Фурье – φ_x ; 3 – идеальный входной сигнал – $\varphi_{\text{вх}}$

Fig. 5. Phase time variation: 1 – of digital filter with correction of amplitude and phase errors – φ_y ; 2 – of digital Fourier filter – φ_x ; 3 – the ideal input signal – $\varphi_{\text{вх}}$

Более наглядно указанные процессы представлены на рис. 6, где приведены в градусах изменения во времени разностей фаз $\Delta\varphi_x$, $\Delta\varphi_y$, которые являются фазовыми погрешностями. Как и в предыдущих случаях, режим КЗ наступает в момент времени $t = 0,14$ с. В промежутке времени 0,140–0,161 с, что соответствует периоду входного сигнала с частотой 48 Гц, наблюдаются существенные колебания указанных разностей фаз, достигающих до 60° , при этом характер изменения сигналов практически одинаков. В дальнейшем фазы ЦФФ и ЦФК, а следовательно, и их фазовые погрешности изменяются по-разному: $\Delta\varphi_x = 5,7\text{--}8,2^\circ$ (кривая 2), а $\Delta\varphi_y = 0$ (прямая 1), т. е. происходит полная компенсация фазовой погрешности.

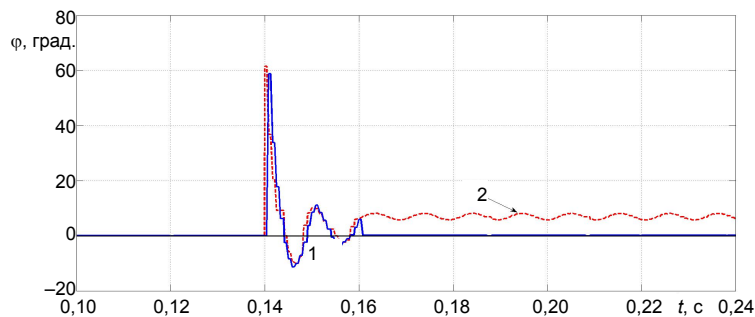


Рис. 6. Изменение во времени разностей фаз: 1 – $\Delta\varphi_y$; 2 – $\Delta\varphi_x$

Fig. 6. Time variation of phase differences: 1 – $\Delta\varphi_y$; 2 – $\Delta\varphi_x$

Комплексная оценка амплитудной и фазовой погрешностей ЦФФ $\Delta\varphi_x = f(\Delta X_m)$ и ЦФК $\Delta\varphi_y = f(\Delta Y_m)$ приведены на рис. 7.

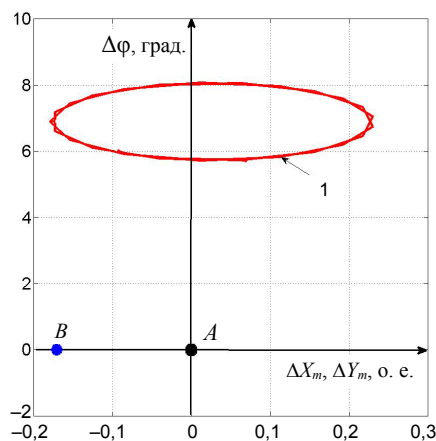


Рис. 7. Комплексная погрешность $\Delta\varphi_x = f(\Delta X_m)$ и $\Delta\varphi_y = f(\Delta Y_m)$

Fig. 7. Complex error $\Delta\varphi_x = f(\Delta X_m)$ и $\Delta\varphi_y = f(\Delta Y_m)$

Если КЗ характеризуется только увеличением амплитуды сигналов при номинальной частоте сети, то оба ЦФ ведут себя практически одинаково. Погрешности, как амплитудная, так и фазовая, в установившемся режиме у них отсутствуют и траектория движения рабочей точки у обоих ЦФ не выходит за пределы начала координат (точка А).

Иное происходит в установившемся режиме КЗ, сопровождающемся снижением частоты до 48 Гц. Как указывалось выше, для ЦФФ амплитудная погрешность лежит в диапазоне 0,18–0,23 о. е., а фазовая погрешность изменяется от 5,7 до 8,2°. На рис. 7, где в качестве аргумента выступает амплитудная погрешность ΔX_m , а в качестве функции – фазовая $\Delta\varphi_x$, комплексная погрешность ЦФФ в плоскости $\Delta\varphi_x = f(\Delta X_m)$ представляется замкнутой фигурой (кривая 1).

У ЦФК фазовая погрешность отсутствует, и поэтому комплексная оценка содержит только амплитудную погрешность, которая вырождается в точку В, отстоящую от начала координат (точка А) на расстояние $\Delta Y_m = 0,17$ о. е.

ВЫВОДЫ

1. Разработан функциональный алгоритм коррекции амплитудной и фазовой погрешностей сигналов для микропроцессорных систем автоматизации и релейной защиты.

2. Результаты выполненных исследований показали, что цифровой фильтр, выполненный на основе указанного алгоритма, позволяет практически полностью исключить проявление амплитудной и фазовой погрешностей в установившихся режимах в диапазоне изменения частоты 47–52 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 594 с.
3. Фадке, А. Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / А. Г. Фадке, Д. С. Торп; пер. с англ. под ред. Г. С. Нудельмана. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
4. Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем / П. Ф. Рибейро [и др.]. М.: Техносфера, 2020. 496 с.
5. Румянцев, Ю. В. Быстродействующий метод определения амплитуды сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и управления при колебаниях частоты / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 1. С. 5–15. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15>.
6. Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 42–54. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54>.
7. Романюк, Ф. А. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>.
8. 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>.
9. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.
10. Дзэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дзэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
11. Фадке, А. Г. Синхронизированные векторные измерения и их применения / А. Г. Фадке, Д. С. Торп; пер. с англ. 2-е изд. М.: Техносфера, 2021. 320 с.
12. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
13. Бондаренко, В. Ф. MATLAB. Основы работы и программирования, компьютерная математика: учеб. курс / В. Ф. Бондаренко, В. Д. Дубовец. Минск: Харвест, 2010. 256 с.
14. Гилат, А. MATLAB. Теория и практика / А. Гилат; пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2016. 416 с.

Поступила 02.07.2024 Подписана в печать 09.09.2024 Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection for Electrical Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
2. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Phadke A. G., Thorp J. S. (2009) *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd. 326. <https://doi.org/10.1002/9780470749722>.
4. Ribeiro P. F., Duque C. A., Silveira P. M. da, Cerqueira A. S. (eds.) (2014) *Power Systems Signal Processing for Smart Grids*. John Wiley & Sons, Ltd. 417. <https://doi.org/10.1002/9781118639283>.

5. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu. (2024) A Fast-Response Method for Determining the Amplitude of a Signal in Microprocessor Automation and Control Systems with Frequency Fluctuations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 5–15. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15> (in Russian).
6. Romaniuk E. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A. (2020) Reducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 42–54. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54> (in Russian).
7. Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S. (2019) Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14> (in Russian).
8. 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).
9. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. A., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412> (in Russian).
10. Dabney J., Harman T. (2003) *Simulink 4. Mastering Secrets*. Moscow, BINOM Publ. 403 (in Russian).
11. Phadke A. G., Thorp J. S. (2017) *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. Power Electronics and Power Systems*. Second Ed. Springer. 285. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50584-8>.
12. 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).
13. Bondarenko V. F., Dubovets V. D. (2010) *MATLAB. Fundamentals of Work and Programming, Computer Mathematics*. Minsk, Harvest Publ. 256 (in Russian).
14. Gilat A. (2011) *MATLAB. An Introduction with Applications*. 4th ed. Wiley. 418.

Received: 02 July 2024

Accepted: 09 September 2024

Published online: 31 January 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-17-34>

УДК 621.311.001.57

Модели текущего технического состояния электрооборудования для расчета надежности систем электропитания монопотребителей в рамках риск-ориентированного подхода

Ю. А. Секретарев¹⁾, А. А. Горшунов¹⁾

¹⁾Новосибирский государственный технический университет
(Новосибирск, Российская Федерация)

Реферат. В статье рассматривается результат моделирования значений текущего технического состояния электрооборудования на основе разработанных математических моделей. Реализация моделей представлена программным комплексом. Перед началом процесса моделирования рассматривались 72 схемы электропитания потребителей. Наибольший интерес для моделирования представляют 50 схем ответственных потребителей. Моделируемое интегральное значение текущего состояния в зависимости от количества оборудования, за которым осуществляется мониторинг, изменяется. В ходе исследования для каждой из рассмотренной схемы получен ряд значений, имитирующих выборочную совокупность индекса технического состояния, выдвинута гипотеза о нормальном распределении генеральных совокупностей и проведена их проверка с помощью критерия согласия Пирсона. При увеличении числа, учитываемого в процессе мониторинга электрооборудования, происходит уменьшение среднего значения индекса технического состояния. Данный показатель имеет накопительную оценку технического состояния всей рассматриваемой системы электропитания. С учетом индекса технического состояния получены значения вероятностей безотказной работы схем электропитания рассматриваемых потребителей. Значение вероятности безотказной работы рассматриваемых схем систем электропитания в случае учета текущего технического состояния их элементов снижается. Результаты моделирования и расчетов показывают необходимость мониторинга за текущим техническим состоянием электрооборудования и регулярный перерасчет значений показателей надежности для схем электропитания с целью принятия наиболее эффективного решения по выводу электрооборудования в плановый ремонт. С целью уменьшения значения вероятности отказа электрооборудования в системах электропитания требуется проводить регулярные оценки технического состояния и выполнять плановые технические обслуживания и ремонтные работы. Для получения более точной оценки надежности следует получать дополнительные сведения о состоянии оборудования, например информацию о проведенном техническом обслуживании, выполненных ремонтах и обнаруженных дефектах. Полученные данные могут быть применены для уменьшения вероятности простоя оборудования, увеличения

Адрес для переписки

Секретарев Юрий Анатольевич
Новосибирский государственный
технический университет
просп. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск,
Российская Федерация,
Тел.: +7383-346-15-51
sekretarev@corp.nstu.ru

Address for correspondence

Sekretarev Yuri A.
Novosibirsk State
Technical University
20, K. Marx Ave.,
630073, Novosibirsk,
Russian Federation
Tel.: +7383-346-15-51
sekretarev@corp.nstu.ru

частоты проведения технического обслуживания и ремонта и, как результат, снижения негативных последствий от недоотпуска электроэнергии.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, система электроснабжения, индекс технического состояния, моделирование мониторинга за техническим состоянием, надежность систем электроснабжения, закон нормального распределения, критерий согласия Пирсона

Для цитирования: Секретарев, Ю. А. Модели текущего технического состояния электрооборудования для расчета надежности систем электроснабжения монопотребителей в рамках риск-ориентированного подхода / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 17–34. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-17-34>

Models of the Current Technical Condition of Electrical Equipment for Calculating the Reliability of Power Supply Systems for Single-Users within the Framework of a Risk-Based Approach

Yu. A. Sekretarev¹⁾, A. A. Gorshunov¹⁾

¹⁾Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russian Federation)

Abstract. The article considers the result of simulation the values of the current technical condition of electrical equipment based on the developed mathematical models. The models are implemented through a software package. Before the simulation, 72 power supply circuits were analyzed, and it occurred that 50 supply circuits of responsible consumers are of the greatest interest for simulation. The simulated integral value of the current state varies depending on the amount of pieces of equipment being monitored. In the course of the study, for each of the circuits under consideration, a number of values were obtained that simulate the selective combination of the technical condition index, a hypothesis was also put forward that the distribution of the populations is normal, and the verification of the latter was carried out using the Pearson criterion. With an increase in the number of pieces of electrical equipment taken into account in the monitoring, the average value of the technical condition index decreases. This indicator provides a cumulative assessment of the technical condition of the entire power supply system being examined. Taking into account the technical condition index, the values of the probability of trouble-free operation of the power supply circuits of the relevant consumers in question have been obtained. The probability of trouble-free operation of the circuits of power supply systems under consideration decreases if the current technical condition of their elements is taken into account. The simulation and calculations results indicate the necessity of regularly monitoring the current technical condition of electrical equipment and regularly recalculating the values of reliability indicators for power supply circuits in order to make the most effective decision on putting electrical equipment into scheduled repair. In order to reduce the probability of failure of electrical equipment in power supply systems, regular technical condition assessments as well as scheduled maintenance and repair work are required, while in order to obtain a more accurate reliability assessment, additional information on the condition of the equipment should be involved, such as maintenance and repair data, as well as information about the defects detected. The data obtained in the article can be used to reduce the likelihood of equipment downtime, increase the frequency of maintenance and repair, and, as a result, reduce the negative effects of under-supply of electricity.

Keywords: risk-based methodology, electrical power system, technical condition index, technical condition monitoring simulation, power supply system reliability, normal distribution law, Pearson criterion

For citation: Sekretarev Yu. A., Gorshunov A. A. (2025) Models of the Current Technical Condition of Electrical Equipment for Calculating the Reliability of Power Supply Systems for Single-Users within the Framework of a Risk-Based Approach. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (1), 17–34. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-17-34> (in Russian)

Введение

Управление рисками на предприятиях электроэнергетики включает в себя комплексный подход, охватывающий технические и экономические аспекты. Риск-ориентированный подход (РОП) может быть эффективным решением проблемы управления рисками.

В широком смысле РОП представляет собой набор методов, ориентированных на управление рисками в различных областях промышленного производства. Основное внимание уделяется систематическому выявлению, анализу и управлению рисками с целью минимизации негативных последствий и максимизации возможностей. Выделяются следующие ключевые элементы РОП:

- 1) анализ и определение потенциальных угроз, которые могут повлиять на достижение целей или успешное выполнение задач;
- 2) определение вероятности возникновения событий и оценка их воздействия на организацию или процесс;
- 3) разработка планов и мероприятий для помощи в принятии оптимальных решений многокритериальных задач;
- 4) систематическое отслеживание изменений во внутренних процессах и регулярное обновление стратегий управления рисками.

РОП помогает предприятиям более эффективно реагировать на неопределенность, а также лучше использовать возможности, предоставляемые изменчивостью внешней среды. Этот подход может быть применен в различных сферах деятельности, включая управление техническими проектами, стратегическим управлением и другими областями.

РОП в электроэнергетике представляет собой последовательность действий для управления рисками в отрасли. Подход ориентирован на эффективное предотвращение и управление негативными последствиями событий, которые могут возникнуть в области производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. РОП позволяет повысить устойчивость энергосистем к различным угрозам, улучшить качество обслуживания, снизить вероятность аварий и минимизировать негативные экономические и социальные последствия при присутствии технологических, экономических и экологических вызовов.

РОП включает в себя систематическое управление рисками, связанными с возможными отказами и неполадками электрооборудования. Для обеспечения надежного функционирования систем электроснабжения (СЭС) необходимо проводить регулярное техническое обслуживание и ремонты (ТОиР) их элементов. Однако изношенность сетей, при их разветвленности, не способствует надежному обеспечению потребителей электроэнергией [1]. Воздушные линии электропередач (ВЛЭП) относятся к объектам, которые при завершении нормативного срока службы практически не заменяются на новые, обеспечение эффективности их работы достигается путем совершенствования системы ТОиР [2].

Существует несколько подходов к ТОиР технических систем, включая оборудование в электроэнергетической отрасли.

Метод ремонтов по техническому состоянию предполагает проведение ремонтных работ на оборудовании исходя из его фактического технического состояния, а не по заранее составленному графику, следовательно, ремонты проводятся на оборудовании, составные части которого имеют наибольший износ, и общие затраты могут быть снижены.

Планово-предупредительные ремонты (ППР) – вид ТОиР, включающий в себя запланированное и регулярное проведение ремонтных работ электрооборудования с целью предотвращения его отказов, улучшения надежности СЭС и продления срока службы элементов. Существенным недостатком данного метода является вероятность проведения ТОиР на оборудовании, обладающем высоким уровнем технического состояния в момент проведения работ.

Также может быть применен гибридный подход к ремонтам, который включает элементы и стратегии как ППР, так и ремонтов по техническому состоянию. Метод сочетает в себе преимущества обеих стратегий с целью обеспечения баланса между эффективностью, оперативностью и учетом реального технического состояния электрооборудования.

Выбор оптимальной стратегии ТОиР является важным элементом эффективного управления СЭС, который позволяет существенно повысить уровень надежности и снизить риски, связанные с экономическими последствиями отказов электрооборудования.

Теория вопроса

Отказ электрооборудования и его текущее техническое состояние являются независимыми событиями. Как известно, событие, связанное с отказом, характеризуется вероятностью безотказной работы P , а состояние оборудования – показателем его текущего технического состояния J . В данном случае происходит наложение двух вышеуказанных событий

$$P_{TCI} = P \times J_{un.eq}. \quad (1)$$

Элементы СЭС, такие как ЛЭП, трансформаторы, коммутационные аппараты и другие, имеют большое значение в обеспечении надежности схем. Помимо элементов схемы на расчеты надежности оказывает большое влияние и режим работы СЭС. Возможность перераспределения энергии в случае выхода из строя элемента может быть ограничена пропускной способностью системных компонентов, таких как линии и трансформаторы. Также наличие резервирования, то есть наличие запасных или дублирующих элементов, способно повысить надежность СЭС, предоставляя дополнительные возможности передачи энергии в случае выхода из строя основных компонентов. При проведении анализов и расчетов надежности СЭС учитываются данные факторы [3].

Формула Пуассона применяется для расчета вероятности наступления определенного количества событий (например, отказа оборудования) в заданном интервале времени. Запись формулы Пуассона имеет следующий вид:

$$P = \frac{(\omega \times t)^k}{k!} e^{-\omega \times t}, \quad (2)$$

где ω – параметр потока отказов, 1/год; k – количество произошедших событий за интервал времени; t – интервал времени, в течение которого рассматриваются события, год.

Если не происходит никаких аварий (отказов) в СЭС, то k в данном случае равно нулю. Данное число обозначает отсутствие отказов. Обычно промежуток времени, в течение которого рассматриваются события, составляет один год. По этой причине формула становится более простой и вероятность отсутствия отказов принимает следующий вид:

$$P = e^{-\omega \times t}. \quad (3)$$

Данная формула отражает вероятность отсутствия каких-либо отказов в определенном временном промежутке. Необходимо отметить, что применение формулы Пуассона подразумевает, что события происходят независимо друг от друга и среднее количество событий в заданном интервале остается постоянным.

В электроэнергетике широко используется метод блок-схем (или блочных схем) для удобного и эффективного расчета надежности схем [4]. Этот метод позволяет отображать системы, состоящие из сложных схем, эквивалентными блоками (элементами), что упрощает анализ и расчеты надежности. Также это дает возможность инженерам и специалистам по надежности легко создавать блок-схемы сложных СЭС с большим количеством компонентов, что позволяет сделать их более понятными и простыми в понимании. Кроме того, это позволяет проводить анализ в различных режимах работы СЭС [5–7].

На практике элементы СЭС (потребители) могут быть соединены между собой различными способами, образуя сложные схемы электроснабжения. Последовательное соединение является одним из наименее надежных способов соединения элементов. При данном способе соединения выход из строя хотя бы одного элемента приводит к отказу в функционировании всей СЭС. При параллельном соединении элементы взаиморезервируемы: если один из двух элементов выходит из строя, второй берет на себя функции обоих элементов (если нет ограничений по пропускной способности).

Индекс технического состояния (ИТС) представляет собой интегральный показатель для оценки состояния элементов в СЭС. Структурная схема единицы электрооборудования приводится на рис. 1.

Функциональные узлы оборудования создаются путем сборки конструктивных элементов и деталей, которые способны выполнять свои

функции только совместно. Эти элементы являются неотъемлемой составляющей электрооборудования. В связи с этим факторы, влияющие на работу функциональных узлов, являются важными. Поэтому для начала расчетов требуется произвести оценку для каждого отдельного элемента или детали оборудования.

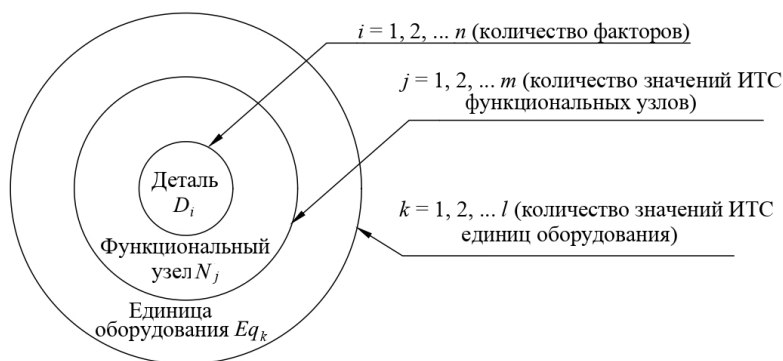


Рис. 1. Структурная схема единицы оборудования

Fig. 1. Block diagram of a piece of equipment

Опираясь на методику, вычисляется ИТС функциональных узлов, используя полученные оценки. Эти вычисления предоставляют возможность получить полную оценку всего рассматриваемого электрооборудования [8–10]. Любой элемент, входящий в состав СЭС, считается единицей оборудования. Расчет ИТС для электрооборудования осуществляется в соответствии с определенным алгоритмом [11].

Каждому фактору (детали) D_i в составе функционального узла N_j соответствуют два весовых коэффициента – весовой коэффициент состояния O_i и весовой коэффициент значимости V_i .

Весовой коэффициент состояния является оценкой фактического технического состояния детали D_i рассматриваемого функционального узла N_j . Данный показатель определяется экспертами на основе данных мониторинга и диагностики оборудования и показывает степень развития дефектов в определенный момент времени.

Весовой коэффициент значимости является числовым значением, показывающим значимость рассматриваемой детали D_i относительно других деталей данного функционального узла N_j во время эксплуатации. Данный показатель определяется экспертами на основе их знаний о конструктивных, функциональных особенностях оборудования и опыта его эксплуатации.

Расчет ИТС функционального узла N_j осуществляется по формуле

$$J_{j.f.n} = 100 \cdot \frac{\sum (V_i \times O_i)}{10} \% , \quad (4)$$

где V_i – весовой коэффициент значимости детали D_i ; O_i – весовой коэффициент (оценка) состояния детали D_i в баллах от 1 до 10.

Применяя рассчитанные значения ИТС $J_{j.f.n}$ каждого функционального узла N_j и заранее определенные значения весовых коэффициентов значимости V_j функциональных узлов, может быть рассчитано значение ИТС $J_{un.eq}$ каждой единицы электрооборудования Eq_k .

Весовой коэффициент значимости функционального узла – это числовое значение, отражающее важность рассматриваемого узла по сравнению с другими узлами, связанными с рассматриваемым оборудованием. Аппарат экспертных оценок дает возможность получать информацию даже при отсутствии статистической информации. Опыт в эксплуатации и знание особенностей конструкции единиц электрооборудования (трансформаторов, выключателей и др.) позволяют определить функциональные узлы оборудования и их весовые оценки.

Расчет ИТС единицы электрооборудования Eq_k следует производить по формуле

$$J_{k.un.eq} = \sum (V_j \times J_{j.f.n}), \quad (5)$$

где V_j – весовой коэффициент значимости для j -го функционального узла; $J_{j.f.n}$ – индекс технического состояния j -го функционального узла.

В ходе эксплуатации техническое состояние электрооборудования постоянно меняется. В результате этого ИТС способен принимать различные значения в пределах от 0 до 100 %. Эта шкала отражает уровень состояния СЭС, где 0 означает самое низкое значение оценки, а 100 – самое высокое.

На основе методики оценки ИТС электрооборудования была разработана математическая модель

$$J_{k.un.eq} = \sum_1^j V_j \times J_{j.f.n} = \sum_1^j \left(V_j \times \sum_1^i (O_i \times V_i) \right), \quad (6)$$

где V_j – весовой коэффициент значимости функционального узла N_j ; $J_{j.f.n}$ – индекс технического состояния функционального узла N_j ; O_i – весовой коэффициент (оценка) состояния детали D_i ; V_i – весовой коэффициент значимости детали D_i ; i – количество деталей в функциональном узле N_j ; j – то же функциональных узлов в составе единицы оборудования Eq_k .

Ход исследования

Исследование проводилось для СЭС монопотребителей. Монопотребитель – это совокупность СЭС и потребителя электроэнергии, где режим электроснабжения определяется особенностями производства. Примерами монопотребителей являются объекты нефтегазовой отрасли, где основным процессом является добыча нефти или газа. Более 90 % потребляемой электроэнергии направляется на производство продукции. Нарушения в электроснабжении приводят к полной остановке производства. Недостаток электроэнергии напрямую влияет на работу монопотребителя. Произ-

водительность добывающих установок является определяющим фактором для объема производства продукции и потребления электроэнергии.

Для оценки надежности используются различные методы и модели, такие как диагностика и прогнозирование надежности. Также важным фактором является выбор надежных компонентов и правильное проектирование СЭС. Надежность является одним из ключевых показателей качества СЭС и влияет на вероятность безотказной работы P всей схемы. При учете фактического технического состояния электрооборудования, которое отличается от идеального, вероятность безотказной работы всей схемы уменьшается [12]. Событие, связанное с вероятностью безотказной работы всей схемы, и событие, относящееся к текущему техническому состоянию отдельных элементов электрооборудования, считаются независимыми [13]. В соответствии с одним из методов оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электростанций и электрических сетей, утвержденных Министерством энергетики Российской Федерации, необходимо произвести оценку каждого функционального узла с использованием известных весовых коэффициентов [11]. В результате проведенной экспертизы специалисты ПАО «Газпромнефть» получили весовые коэффициенты для функциональных узлов воздушных линий и трансформаторов. Табл. 1 и 2 содержат данные, которые являются весовыми коэффициентами значимости функционального узла N .

Таблица 1

Весовые коэффициенты функциональных узлов воздушной линии
Weight coefficients of the functional units of a overhead line

Единица оборудования	№ узла	Функциональный узел	Весовой коэффициент
Воздушная линия	1	Крепление	0,10
	2	Стойка	0,03
	3	Траверса	0,07
	4	Заземляющее устройство	0,03
	5	Разрядники	0,10
	6	Трасса ВЛ	0,20
	7	Провод, кабельная вставка	0,47

Таблица 2

Весовые коэффициенты функциональных узлов трансформатора
Weight coefficients of the functional units of a transformer

Единица оборудования	№ узла	Функциональный узел	Весовой коэффициент
Трансформатор	1	Изоляционная система	0,32
	2	Магнитная система	0,18
	3	Обмотки	0,18
	4	Высоковольтный ввод	0,13
	5	Устройство РПН	0,10
	6	Система охлаждения	0,09

Расчеты надежности разветвленных схем СЭС являются сложной задачей, требующей значительных усилий. Для упрощения и ускорения этого процесса предложено внедрить автоматизированное решение, использующее возможности компьютерных систем (ЭВМ) [14, 15]. В рамках разработки программного алгоритма для автоматизированного расчета проведен процесс нормирования весовых коэффициентов. Эта процедура необходима для согласования значений весовых коэффициентов на различных функциональных узлах. Необходимо выполнить этот шаг, чтобы установить соответствие между размерностями значений $J_{un,eq}$ и P .

Табл. 3 содержит результаты нормирования весовых коэффициентов.

Таблица 3

**Весовые нормированные коэффициенты функциональных
узлов электрооборудования**

Weight normalized coefficients of the functional units of electrical equipment

Единица оборудования	№ узла	Функциональный узел	Весовой коэффициент
Трансформатор	1	Изоляционная система	0,160
	2	Магнитная система	0,090
	3	Обмотки	0,090
	4	Высоковольтный ввод	0,065
	5	Устройство РПН	0,050
	6	Система охлаждения	0,045
Воздушная линия	7	Крепление опоры	0,050
	8	Приставка, стойка	0,015
	9	Траверса	0,035
	10	Заземляющее устройство	0,015
	11	Коммутационные аппараты, разрядники	0,050
	12	Трасса ВЛ	0,100
	13	Провод, кабельная вставка	0,235

Данная таблица содержит весовые коэффициенты для одноцепных воздушных линий (ВЛ). В большинстве рассматриваемых схем преобладают двухцепные ВЛ. Для учета этого факта в модели и корректного представления значений весовых коэффициентов 12-го и 13-го функциональных узлов необходимо увеличить значения этих коэффициентов в два раза.

В соответствии с методикой оценки ИТС [11] требуется представлять оценки в числовом формате для отражения текущего технического состояния функционального узла, или степень развития дефекта в данном узле по сравнению с другими, входящими в рассматриваемую единицу электрооборудования. Весовой коэффициент отражает важность функционального

узла в общем комплекте оборудования и показывает его влияние на общую эксплуатацию оборудования [16–18].

На текущий момент не существует точных математических моделей, которые могли бы в достаточной степени оценить влияние неисправностей и дефектов на возможные отказы с конкретными последствиями, как, например, замена элементов оборудования или восстановительный ремонт. В связи с этим необходимо применять аппарат экспертных оценок. Ответы экспертов помогают обнаруживать ценную информацию о причинах технических неполадок и позволяют предпринять меры для их предотвращения в будущем. Экспертные оценки играют важную роль в процессе определения и устранения неполадок, что делает их неотъемлемой частью предложенной модели.

Как уже отмечалось, отсутствие статистической информации о возникновении и скорости роста дефектов в функциональных узлах электрооборудования позволяет предположить, что эти события происходят случайным образом [19]. С целью оценки влияния ИТС на надежность схемы СЭС была разработана и реализована математическая модель, основанная на методе Монте-Карло, или методе статистических испытаний. Эта модель позволяет получить статистическую информацию о процессе. Оценка состояния функциональных узлов рассматривается как случайная величина, которая вычисляется с помощью весовых показателей. Эти показатели нормированы и изменяются от 0 до 1. Именно поэтому был выбран генератор псевдослучайных чисел, который имеет равномерное распределение:

$$J_{k.un.eq} = \sum_j \left[\left(\frac{\sum_i^n RANDOM}{n} \right) \times V_j \right], \quad (7)$$

где *RANDOM* – генератор псевдослучайных чисел, генерирующий в пределах от 0 до 1; *n* – количество испытаний.

Данная модель используется для создания числовых значений, отражающих техническое состояние каждой отдельной единицы электрооборудования ($J_{k.un.eq}$). Каждая единица электрооборудования, которая рассматривается как компонент СЭС, включает в себя функциональные узлы. Для каждого из этих функциональных узлов производится оценка, учитывающая различные варианты питания потребителей в соответствии с моделями (5) и (7).

В процессе исследования изучены 72 различные схемы электроснабжения объектов на нефтяных месторождениях Сибири. Среди них были обнаружены двух- и одноцепные линии, при этом двухцепные линии оказались самыми распространенными (51 схема). После проведения анализа всех представленных схем выбрано несколько типовых вариантов, которые представлены на рис. 2.

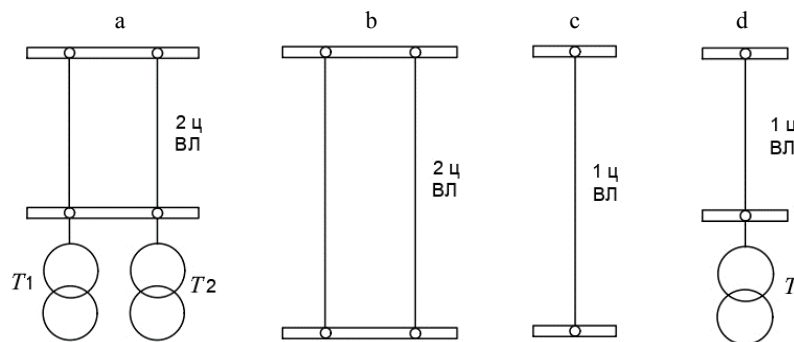


Рис. 2. а – схема двухцепной линии с трансформаторами; б – то же без трансформаторов; в – одноцепная линия без трансформатора; г – то же с трансформатором

Fig. 2. а – an electrical circuit featuring a double-circuit transmission line with transformers; б – a double-circuit transmission line without transformers; в – a single-circuit transmission line without a transformer; г – a single-circuit transmission line a transformer

Результаты исследования

Математическая модель основана на генерации псевдослучайных чисел в определенном диапазоне. Необходимо определить закон распределения и разброс случайной величины, которые зависят от характеристик и количества рассматриваемого электрооборудования. В настоящее время нет статистической информации о текущем техническом состоянии функциональных узлов и деталей электрооборудования. Для создания имитационной выборки проводится моделирование с использованием модели (7). Для получения репрезентативной выборки необходимо провести не менее 200 итераций. Первый этап моделирования был выполнен для случая двухцепной воздушной линии с трансформаторами (рис. 2а).

Математическое ожидание случайной дискретной величины составило $M(X) = 0,732$. Формулируется гипотеза H_0 о том, что моделируемая случайная величина X подчиняется нормальному закону распределения, а также гипотеза H_1 , предполагающая отклонение величины X от предполагаемого распределения.

Для достижения согласованности между теоретическим и статистическим распределением выполняется выравнивание с помощью теоретической кривой. Требуется вычислить среднее значение и стандартное отклонение выборки, а также выполнить переход от интервального ряда к дискретному. Далее на гистограмму накладывается теоретическая кривая, результат представлен на рис. 3.

Проверка согласия между теоретическими и статистическими частотами осуществляется с помощью критерия χ^2 Пирсона. Чтобы избежать значительных и необоснованных расхождений, требуется внести изменения в значения частот в соответствующих интервалах. Для этого необходимо объединить соседние интервалы с частотами менее 5.

В каждом из случаев проведенного исследования подтверждается гипотеза H_0 (распределение случайной моделируемой величины, отражающей текущее техническое состояние электрооборудования, соответствует нор-

мальному закону распределения). Результаты моделирования находят подтверждение в применении центральной предельной теоремы для независимых слагаемых с равномерным законом распределения [20].

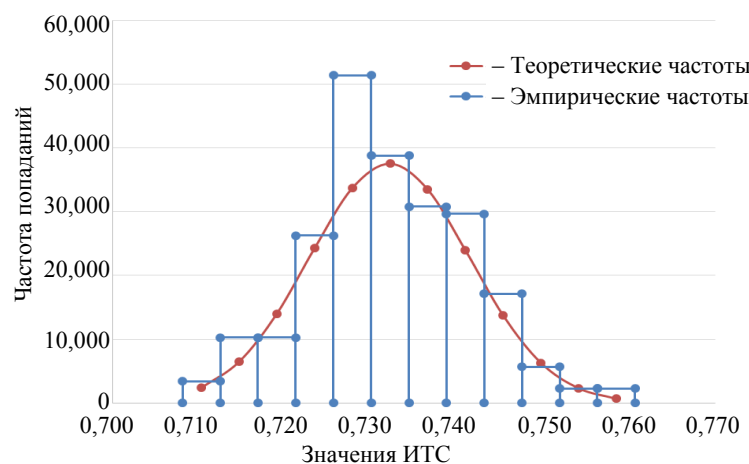


Рис. 3. Гистограммы теоретических и эмпирических частот для рис. 2а

Fig. 3. Histograms of theoretical and empirical frequencies for fig. 2a

В рассматриваемой модели генерируемые оценки функциональных узлов электрооборудования (X_i) представляют собой независимые случайные величины. Каждая из этих величин подчиняется равномерному закону распределения. Совмещенная гистограмма представлена на рис. 4. Значение ИТС обладает накопительным характером. В процессе моделирования значений мониторинга текущего технического состояния электрооборудования математическое ожидание общего показателя ИТС уменьшается при увеличении числа учтенного оборудования. Аналогично проверяются другие гипотезы о нормальном распределении для других вариантов схем. Результаты сводятся в табл. 4.

Таблица 4

Результаты проверки гипотез по критерию Пирсона

Results of hypothesis testing using the Pearson criterion

Вариант схемы	Рассматриваемые значения			
	Математическое ожидание генерируемой величины $M(X)$	Число степеней свободы k	Наблюдаемое значение критерия Пирсона χ^2	Критическое значение критерия Пирсона χ^2
Двухцепная воздушная линия	0,92015994	7	8,420	14,1
Одноцепная воздушная линия	0,55086108	7	1,963	
Одноцепная воздушная линия и трансформатор	0,550665215	7	5,702	

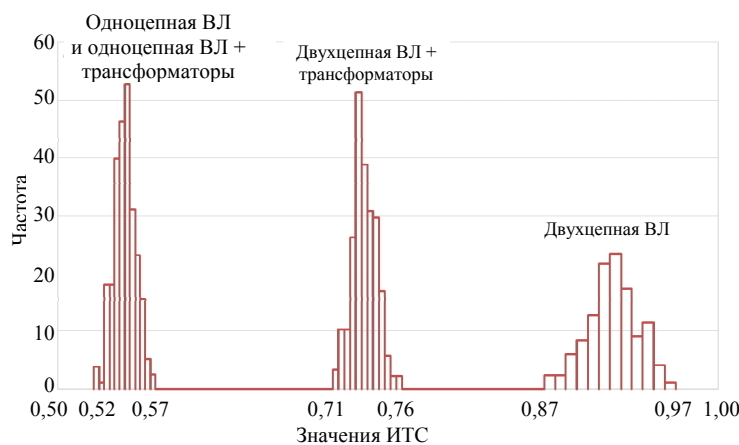


Рис. 4. Общая гистограмма частот

Fig. 4. General frequency histogram

Для оценки надежности всей схемы СЭС необходимо выполнять преобразование всей блок-схемы, чтобы создать эквивалентный элемент. Этот процесс осуществляется поэтапно, сначала преобразовываются параллельные элементы, а затем последовательные. Необходимо последовательно переходить от одного этапа к другому, чтобы достичь желаемого результата.

Изображение двухцепной ВЛ на блок-схеме разделено на три блока. Два из них показывают возможные отказы отдельных цепей в линии, а третий блок описывает одновременный отказ и первой, и второй цепей. Из-за географических ограничений нельзя построить двухцепную линию на всем ее протяжении. Участок ВЛ, представленный одноцепными линиями, изображен двумя блоками, представляющими каждую цепь. На рис. 5а представлена схема электроснабжения потребителя, а на рис. 5б – составленная блок-схема.

Расчеты надежности схемы и фактической надежности, учитывающие результаты моделирования технического состояния электрооборудования для определенного потребителя, представлены на рис. 6 и 7. С учетом предоставленных модельных данных общая надежность всей схемы снижается, что влечет за собой увеличение частоты возникновения отказов.

Решение по эксплуатации напрямую зависит от технического состояния оборудования. Актуальная информация о неисправностях электрооборудования необходима для достоверной оценки надежности электроснабжения потребителей. Анализ 50 других схем, рассмотренных в расчетах, показал, что учет дефектов, возникающих на электрооборудовании в процессе эксплуатации, приводит к увеличению вероятности отказа системы электроснабжения. Эти результаты также указывают на снижение вероятности безотказной работы.

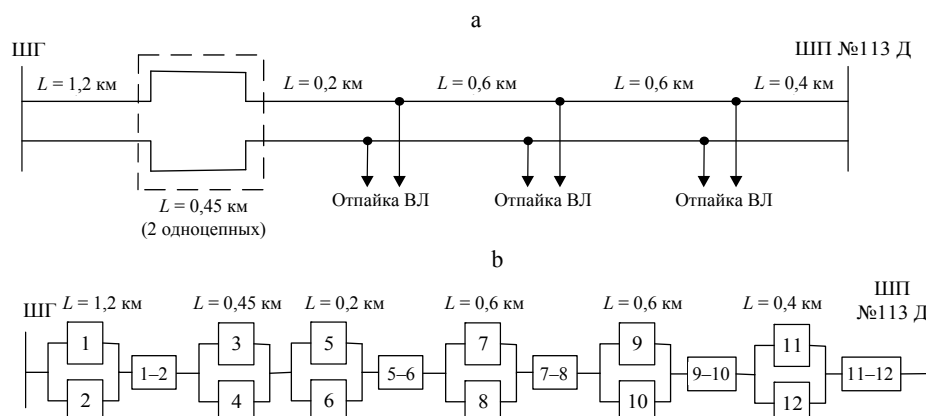


Рис. 5. Составление блок-схемы потребителя: а – схема электроснабжения, которая используется у данного потребителя; б – блок-схема

Fig. 5. Preparation of a block diagram of a consumer: a – the power supply scheme that is used by this consumer power supply arrangement; b – the block diagram

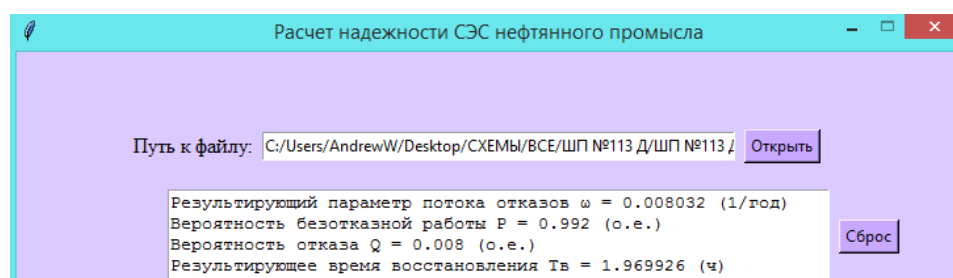


Рис. 6. Вид расчета надежности в программе для ЭВМ

Fig. 6. Type of reliability calculation in a computer program

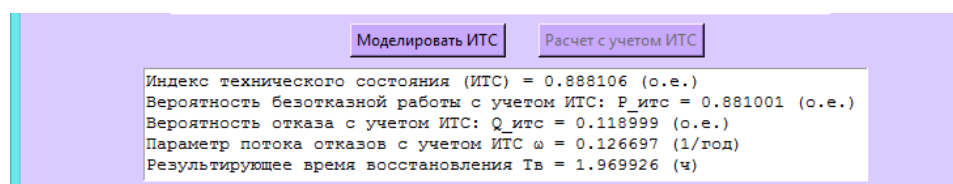


Рис. 7. Вычисление фактической надежности в программе для ЭВМ

Fig. 7. Calculation of actual reliability in a computer program

Важным моментом перед принятием решения о необходимости проведения ремонтно-восстановительных мероприятий на единицах оборудования СЭС является выбор критерия управления – это процесс, при котором определяется основной фокус или цель управления. Этот выбор может быть основан на различных факторах, таких как обеспечение безопасности, повышение эффективности, сокращение времени простоя и другие соответствующие аспекты, в зависимости от конкретных условий и требований. Необходимо также учесть потребности и разработать стратегию

управления предприятия. Для монопотребителей данным критерием может выступать минимизация ущерба от недоотпуска электроэнергии

$$Y_{\text{сум}} \rightarrow \min.$$

Риск отказов оборудования в электрических сетях промышленных предприятий, как правило, связан с нарушениями электроснабжения потребителей. Для монопотребителей риск может быть выражен технологической потерей нефти (газа) вследствие недоотпуска электроэнергии.

ВЫВОДЫ

1. Для получения комплексной информации о техническом состоянии оборудования в составе системы электроснабжения создана и реализована математическая модель, состоящая из двух взаимосвязанных частей. Одна составляющая позволяет оценить и рассчитать текущее техническое состояние узлов и деталей электрооборудования СЭС, вторая – производить расчеты схемной надежности.

2. Разработанные математические модели позволяют получить необходимую информацию о текущем техническом состоянии электрооборудования, статистическая информация на сегодняшний день отсутствует или является неполной. С использованием модели получены значения индекса технического состояния для различных вариантов схем СЭС.

3. Математические модели выполнены в виде программного комплекса для моделирования значений ИТС и автоматизированного расчета надежности схем СЭС.

4. Рассматривались 72 схемы СЭС потребителей, расположенных на месторождениях нефти в Сибири. Наибольший интерес для исследования представляют схемы, питающие ответственных потребителей по четырем типовым схемам. Схемы СЭС с двухцепными воздушными линиями показали наивысшие значения ИТС, колеблющиеся в пределах от 0,87 до 0,97. Схемы, включающие двухцепные линии и трансформаторы, характеризуются ИТС от 0,71 до 0,76, в то время как схемы с одноцепными воздушными линиями имеют наименьшие значения ИТС (в пределах от 0,52 до 0,57).

5. Применение критерия согласия Пирсона позволило подтвердить предположение о том, что случайная моделируемая величина ИТС при различных схемах питания соответствует нормальному закону распределения. Это может быть объяснено влиянием центральной предельной теоремы. По теореме при моделировании ИТС единиц электрооборудования наблюдается проявление нормального закона распределения случайной величины при заданном законе равномерного распределения.

6. При применении разработанных моделей результат расчета вероятности безотказной работы СЭС одного из рассмотренных потребителей снизился на 11,2 %. Наибольшее снижение надежности достигло 15,7 %. При учете моделируемых значений ИТС результирующая надежность схем

СЭС снижается. Изменение технического состояния влияет на вероятность возникновения отказов при оценке надежности. Для обеспечения эффективной эксплуатации СЭС необходимо контролировать состояние каждого элемента в течение всего срока эксплуатации. Использование средств мониторинга в режиме реального времени позволяет получить более точную оценку надежности и принять оптимальное решение о ремонте электрооборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Формирование стратегии повышения эффективности работы распределительных электрических сетей на предпроектной стадии / А. В. Жураховский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 155–167. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-155-167>.
2. Автоматизированный анализ срока службы воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445>.
3. Розанов, М. Н. Надежность электроэнергетических систем / М. Н. Розанов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 200 с.
4. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
5. Секретарев, Ю. А. Выбор и принятия решений по управлению ремонтами энергооборудования в системах электроснабжения с монопотребителем / Ю. А. Секретарев, В. М. Левин // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2021. № 2 (83). С. 17–25. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2021.2.2>.
6. Секретарев, Ю. А. Оценка влияния на надежность системы электроснабжения различного рода дефектов ее основных элементов / Ю. А. Секретарев, В. М. Левин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. № 4 (44). С. 55–63.
7. Секретарев, Ю. А. Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов, Д. А. Меняйкин // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2022. Т. 18, № 3 (69). С. 3–14.
8. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy / L. D. Gitelman [et al.] // Energy Production and Management in the 21st Century IV: The Quest for Sustainable Energy. 2020. Vol. 246. P. 125–135. <http://doi.org/10.2495/EPM200121>.
9. Ndawula, M. B. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources / M. B. Ndawula, S. Z. Djokic, I. Hernando-Gil // Energies. 2019. Vol. 12, No 3. P. 531. <https://doi.org/10.3390/en12030531>.
10. Байдюк, М. А. Оценка технического состояния и надежности электрических машин / М. А. Байдюк, Г. В. Комарова // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 3. С. 78–84.
11. Об утверждении Методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей: приказ М-ва энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71679722/>.
12. Bounjimi, M. E. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of the Key Technologies / M. E. Bounjimi, G. Abdul-Nour // International Journal of Engineering Research & Technology. 2021. Vol. 10, No 10. P. 388–393. URL: <https://www.ijert.org/smart-asset-management-in-power-industry-a-review-of-the-key-technologies>.
13. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2022618655. Расчет надежности системы электроснабжения нефтяного промысла в рамках риск-ориентированного подхода: № 2022618356: заявлено 13.05.2022; опубл. 13.05.2022 / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48493547>.
 15. Секретарев, Ю. А. Моделирование технического состояния электрооборудования систем электроснабжения объектов нефтедобывающих предприятий с различными схемами питания / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов // Известия Транссиба. 2023. № 3 (55). С. 120–130.
 16. Risk-Based Maintenance Allocation and Scheduling for Bulk Electric Power Transmission System Equipment / Y. Jiang [et al.] // Proceedings of the Fifteenth International Conference on Systems Engineering (ISENG 2002). Las Vegas, August 6–8, 2002. <https://home.engineering.iastate.edu/~jdm/WebConfPapers/jdm2.pdf>.
 17. Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов / В. М. Левин [и др.] // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 2–3 (79). С. 139–155.
 18. Hashemi-Dezaki, H. Reliability Optimization of Electrical Distribution Systems Using Internal Loops to Minimize Energy Not-Supplied (ENS) / H. Hashemi-Dezaki, H. Askarian-Abyaneh, H. Haeri-Khiavi // Journal of Applied Research and Technology. 2015. Vol. 13, No 3. P. 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2015.07.008>.
 19. Napoleone, L. The Implications of Condition Monitoring on Asset-Related Decision-Making in the Italian Power Distribution Sector / L. Napoleone, I. Roda, M. Macchi // IFAC Papers-OnLine. 2016. Vol. 49, iss. 28. P. 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.019>.
 20. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.
- Поступила 20.02.2024 Подписана в печать 09.09.2024 Опубликовано онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Zhurakhivskiy A. V., Bakhor Z. M., Yatseiko A. Ya., Hapanovych V. H. (2019) Formation of a Strategy for Increasing the Efficiency of Operation of Distribution Electrical Grids at the Stage of Pre-Design Works. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 155–167. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-155-167> (in Russian).
2. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Abdullayeva S. A., Nazarov A. A. (2021) Automated Analysis of Service Life of Air-Lines of the Electricity Transmission of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445> (in Russian).
3. Rozanov M. N. (1984) *Reliability of Electric Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 200 (in Russian).
4. Guk Yu. B. (1988) *Reliability Analysis of Electric Power Equipment*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 224 (in Russian).
5. Sekretarev Yu., Levin V. (2021) Selection and Decision-Making on Managing Repairs of Power Equipment in Power Supply Systems with Monoconsumer. *Newsletter of North-Caucasus Federal University*, (2), 17–25. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2021.2.2> (in Russian).
6. Sekretarev Yu. A., Levin V. M. (2019) Evaluation of the Effect on the Reliability of the Electrical Supply System of a Different Kind of Defects of its Basic Elements. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, (4), 55–63 (in Russian).
7. Sekretarev Yu. A., Gorshunov A. A., Menyakin D. A. (2022) Modeling of the Technical Condition of an Equipment of Power Supply Systems of Mono Consumers Taking into Account Circuit Reliability. *News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 18 (3), 3–14 (in Russian).

8. Gitelman L. D., Kozhevnikov M. V., Chebotareva G. S., Kaimanova O. A. Asset Management of Energy Company Based on Risk-Oriented Strategy. WIT Transactions on Ecology and Environment. Vol. 246. P. 125–135. <http://dx.doi.org/10.2495/EPM200121>.
9. Ndawula MB, Djokic SZ, Hernando-Gil I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources. *Energies*. 2019; 12 (3) : 531. <https://doi.org/10.3390/en12030531>.
10. Baidiuk M. A., Komarova G. V. Evaluating Technical Condition and Reliability of Electrical Machines, *Izvestiya SPbGETU "LETI" [St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" News]*. 2019. No 3. C. 78–84. https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-3_2019_p078-084.pdf (in Russian).
11. On Approval of the Methodology for Assessing the Technical Condition of the Main Technological Equipment and Power Transmission Lines of Electric Stations and Electric Networks. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017. No 676. Access mode: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71679722> (in Russian).
12. Bounjimi M.E., Abdul-Nour G. (2021) Smart Asset Management in Power Industry: A Review of The Key Technologies, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* Vol. 10, No 10. P. 388–393. <https://www.ijert.org/smart-asset-management-in-power-industry-a-review-of-the-key-technologies>.
13. Gmurman V. E. Probability Theory and Mathematical Statistics: Study Guide for Universities. Moscow: Vysshaya shkola [Higher School], 2003. 479 p. (in Russian).
14. Sekretarev Y. A., Gorshunov A. A. Certificate No RU 2022618655. Calculation of Reliability of the Oil Field Power Supply System within the Framework of a Risk-Oriented Approach, Registered 13.05.2022 (in Russian).
15. Sekretarev Y. A., Gorshunov A. A. (2023) Modeling of the Technical Condition of Electrical Equipment of Power Supply Systems of Oil Production Facilities with Various Power Schemes. *Izvestiya Transsiba*. Vol. 3 (55). P. 120–130. [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2023-3\(55\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2023-3(55).pdf) (in Russian).
16. Jiang Y., Ni. M., McCalley J. D., Van Vorhis T. (2002) Risk-based Maintenance Allocation and Scheduling for Bulk Electric Power Transmission System Equipment. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Systems Engineering (ISENG 2002)*. Las Vegas, August 6–8. <https://home.engineering.iastate.edu/~jdm/WebConfPapers/jdm2.pdf>.
17. Levin V. M., Guzhov N. P., Chernenko N. A., Yahya A. A. Methodology for Managing Equipment Repairs in Oilfield Electrical Networks. *Nauchnyi Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2020, No 2–3 (79), 139–155. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155 (in Russian).
18. Hashemi-Dezaki H., Askarian-Abyaneh H., Haeri-Khiavi H. Reliability Optimization of Electrical Distribution Systems Using Internal Loops to Minimize Energy Not-Supplied (ENS) // *Journal of Applied Research and Technology*. 2015. 13 (3). P. 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2015.07.008>.
19. Napoleone L., Roda I., Macchi M. (2020) The Implications of Condition Monitoring on Asset-Related Decision-Making in the Italian Power Distribution Sector. *Energy Production and Management in the 21st Century IV: The Quest for Sustainable Energy*, 246, 125–135. <http://doi.org/10.2495/EPM200121>.
20. Ventsel E. S. (2001) *Probability Theory*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 575 (in Russian).

Received: 20 February 2024 Accepted: 09 September 2024 Published online: 31 January 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-35-44>

УДК 620.92

Определение мест повреждения изоляции неоднородной линии электроснабжения

А. М. Олейников¹⁾, Л. Н. Канов²⁾

¹⁾Институт природно-технических систем (Севастополь, Российская Федерация),

²⁾Севастопольский государственный университет (Севастополь, Российская Федерация)

Реферат. Целью исследования явилась разработка алгоритма реализации точного определения места и характера повреждения изоляции на линии электроснабжения, основу которого составляет математическая модель режима электрической сети на основе теории электрических цепей с распределенными параметрами. Достижение этой цели построено на анализе и математическом описании схем замещения распределительной линии с двумя центрами питания в стационарном режиме с известными коэффициентами распространения и волновыми сопротивлениями и в режиме с повреждением. Подробно описаны уравнения модели, на примере расчета типичных режимов распределительной линии длиной 50 км небольшой мощности с двумя центрами питания продемонстрирована возможность оперативно, в режиме текущего времени получить координату вероятного повреждения изоляции и оценить степень повреждения, а признаком аварийного режима послужило отклонение напряжения на выходах центров питания. В целом рассмотренный способ расчета режима распределительной линии электроэнергетической системы переменного тока позволяет в оперативном режиме отслеживать появление повреждений или несанкционированное подключение нагрузки с целью отбора мощности, при этом данная методика пригодна и для анализа линии с единственным центром питания, а также позволяет оперативно регулировать напряжение источников для управления мощностью нагрузки на необходимом уровне. Перспективным направлением дальнейших исследований может быть распространение методики на разветвленные линии с несколькими ответвлениями нагрузок и центрами питания, что характерно, например, для оффшорных электроэнергетических систем. Кроме того, на рассматриваемой модели может быть построена система контроля изоляции и избирательной защиты разветвленных нагрузок.

Ключевые слова: электрическая сеть, потребители, аварийный участок, напряжение, ток, мощность, математическое моделирование, сопротивление изоляции, холостой ход, короткое замыкание

Для цитирования: Олейников, А. М. Определение мест повреждения изоляции неоднородной линии электроснабжения / А. М. Олейников, Л. Н. Канов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 35–44. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-35-44>

Адрес для переписки

Олейников Александр Михайлович
Севастопольский институт
природно-технических систем
ул. Ленина, 28,
299011, г. Севастополь, Российская Федерация
Тел.: +7 8692 54-40-10
ipts-sevastopol@mail.ru

Address for correspondence

Oleynikov Alexander M.
Institute of Natural
and Technical Systems
28, Lenin str.,
299011, Sevastopol, Russian Federation
Тел.: +7 8692 54-40-10
ipts-sevastopol@mail.ru

Determination of Insulation Fault Locations in a Heterogeneous Power Supply Line

A. M. Oleynikov¹⁾, L. N. Kanov²⁾

¹⁾Institute of Natural and Technical Systems (Sevastopol, Russian Federation),

²⁾Sevastopol State University (Sevastopol, Russian Federation)

Abstract. The purpose of the study was to develop an algorithm for the implementation of an accurate determination of the location and nature of insulation fault on the power supply line, which foundation is a mathematical model of the electrical network mode based on the theory of electrical circuits with distributed parameters. The achievement of this goal is based on the analysis and mathematical description of the replacement circuits of a distribution line with two power centers in the stationary mode with known propagation constants and wave impedances and in a fault mode. The equations of the model are described in detail, using the example of calculating typical modes of a 50 km long low-power distribution line with two power centers, it is demonstrated that it is possible to quickly, in the current time mode, obtain the coordinate of probable insulation fault and assess the degree of it, while an indication of an emergency mode was a voltage deviation at the outputs of the power centers. In general, the method for calculating the mode of the distribution line of an alternating current electric power system under consideration allows quick monitoring of damage or unauthorized connection of the load for the purpose of power take-off, while this technique is also suitable for analyzing a line with a single power supply center, and also makes it possible to quickly adjust the voltage of sources to control the load power at the required level. A promising area for further research may be the extension of the technique to branched lines with several load branches and power centers, which is typical, for example, for offshore electric power systems. In addition, a system for monitoring isolation and selective protection of branched loads can be built on the model under consideration.

Keywords: electrical network, consumers, emergency section, voltage, current, power, mathematical modeling, insulation resistance, idle, short circuit

For citation: Oleynikov A. M., Kanov L. N. (2025) Determination of Insulation Fault Locations in a Heterogeneous Power Supply Line. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (1), 35–44. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-35-44> (in Russian)

Введение

Приоритетным направлением развития современной электроэнергетики является повышение надежности транспортировки электроэнергии [1–5]. В [6–9] были предложены параметрические и графоаналитические методы оперативного анализа повреждений в электрических сетях. В настоящее время этот вопрос решается путем использования пунктов сетевого секционирования за счет локализации и отключения небольшой части сети, в пределах которой произошло повреждение [10–12]. Так как зоны подсоединения потребителей могут быть неравномерно распределены по линии, место аварии, определяемое обычно применяемыми методами, представляется чаще всего номерами точек подключения потребителей [10, 13], однако при значительном расстоянии между точками подключения актуальной остается задача точного определения места повреждения внутри предполагаемого аварийного участка.

В [11] решение этой задачи проведено с применением программного комплекса Wolfram Mathematica, однако предлагаемый там подход создает сложности, связанные с неоднозначностью результатов решения. Целью

настоящей статьи является разработка алгоритма точного определения места и характера аварии на распределительной линии на основании измерения напряжений и токов на центрах питания и нагрузках. Основу алгоритма составляет математическое моделирование режима распределительной линии на основе теории линейных электрических цепей с распределенными параметрами [13–15]. Такая модель позволяет точно определить место аварии и сопротивление поврежденной изоляции.

Математическое описание распределительной линии с повреждением

Рассмотрим произвольную неоднородную распределительную линию электропитания длиной L с двумя центрами питания (рис. 1), которые обеспечивают нагрузку по двум участкам линии ad и db с длинами x_H и $L - x_H$ и с удельными параметрами $\underline{Z}_{B1}, \underline{\gamma}_1$; $\underline{Z}_{B2}, \underline{\gamma}_2$. В точке с координатой x_K имеет место повреждение изоляции с сопротивлением $\underline{Z}_K$. Обе эти величины подлежат определению. Расстояния x_1, x_3, x_2 по линии отсчитываются слева направо; в точке a расстояние $x_1 = 0$; в точке повреждения c : $x_1 = x_K = ?$, $x_3 = 0$; в точке d : $x_3 = x_H$, $x_2 = 0$; в точке b : $x_2 = L - x_H$.

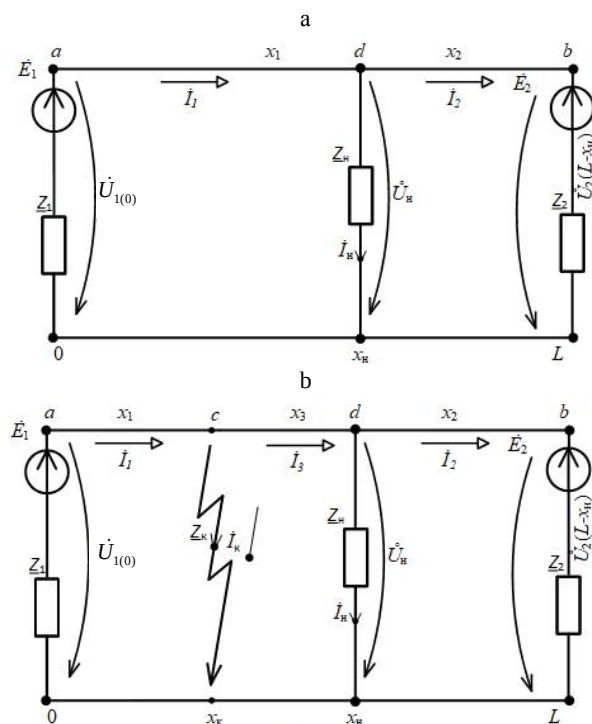


Рис. 1. Распределительная линия с двумя центрами питания:
а – линия в стационарном режиме под нагрузкой; б – то же с повреждением

Fig. 1. Distribution line with two power centers:
a – the line in stationary mode under load; b – the damaged line

Рабочий режим системы определяется эквивалентными ЭДС $\dot{E}_1, \dot{E}_2$, сопротивлениями $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_H$ и напряжениями $\dot{U}_{1(0)}, \dot{U}_{2(L-x_H)}$. При повреждении в зоне $c - x_K$ напряжение в конце первого участка $\dot{U}_{1(0)}$ и $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ в конце линии изменяются по сравнению с рабочим режимом, но остаются доступными измерению.

Каждый из рассматриваемых участков описывается парой комплексных дифференциальных уравнений [10, 11]:

$$-\frac{d\dot{U}}{dx} = (r + j\omega L)\dot{I}; \quad -\frac{d\dot{I}}{dx} = (g + j\omega C)\dot{U},$$

которые дифференцированием по x сводятся к уравнениям второго порядка:

$$-\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} = \underline{\gamma}^2\dot{U}; \quad -\frac{d^2\dot{I}}{dx^2} = \underline{\gamma}^2\dot{I}$$

с решениями вида:

$$\dot{U}(x) = \underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}; \quad \dot{I}(x) = \frac{\underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} - \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}}{\underline{Z}_B},$$

где $\underline{\gamma} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)}$ – коэффициент распространения; $\underline{Z}_B =$

$= \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}}$ – волновое сопротивление; r, g, L, C – первичные удельные параметры линий; $\underline{A}_1, \underline{A}_2$ – комплексные постоянные интегрирования, также подлежащие определению.

Для каждого из трех получившихся участков системы совокупность решений имеет вид [10, 11]:

$$\dot{U}_i(x_i) = \underline{A}_{i1} e^{-\underline{\gamma}_i x_i} + \underline{A}_{i2} e^{\underline{\gamma}_i x_i}; \quad \dot{I}_i(x_i) = \frac{\underline{A}_{i1} e^{-\underline{\gamma}_i x_i} - \underline{A}_{i2} e^{\underline{\gamma}_i x_i}}{\underline{Z}_{Bi}} \quad (1)$$

при $i = 1, 2, 3$; $\underline{\gamma}_1 = \underline{\gamma}_3$; $\underline{Z}_{B1} = \underline{Z}_{B3}$.

Аргументы напряжений и токов изменяются в пределах: для x_1 : $0 \dots x_K$; для x_3 : $0 \dots x_H - x_K$; для x_2 : $0 \dots x_H$. Задача, таким образом, заключается в определении расстояния x_K до точки аварии и сопротивления утечки поврежденной изоляции $\underline{Z}_K$. Анализ следует начинать, когда измерения напряжений $\dot{U}_{1(0)}$ в начале первого участка и $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ в конце второго участка изменяются по сравнению с обычным стационарным режимом, что и свидетельствует об аварийной ситуации. Полагаем, что сопротивление нагрузки $\underline{Z}_H$ не изменилось или доступно измерению.

Предварительно в стационарном штатном режиме должны быть заранее определены коэффициенты распространения $\underline{\gamma}_1, \underline{\gamma}_2$ и волновые сопротивления $\underline{Z}_{B1}, \underline{Z}_{B2}$ по соотношениям [11]:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{Z}_{XX} \underline{Z}_{K3}}; \quad \text{th } \gamma l = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{K3}}{\underline{Z}_{XX}}},$$

где l – длина участка линии; $\underline{Z}_{XX}, \underline{Z}_{K3}$ – входные сопротивления участков линии, определяемые по результатам предварительного измерения напряжения, тока и мощности участка линии в режиме холостого хода и короткого замыкания в условиях полного отсоединения от энергосистемы.

При штатной эксплуатации непрерывно измеряются напряжение $\dot{U}_{1(0)}$ на входе участка линии 1 и напряжение $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ в точке b участка линии 2. Возникшие отклонения этих напряжений от их обычных значений и говорят о возникшем повреждении линии.

Определение точки повреждения и сопротивления утечки

Анализ выполним по результатам решения уравнений рассматриваемых участков линий (1) на основе граничных условий на концах этих участков. Если в начале первого участка измерено напряжение $\dot{U}_{1(0)}$, то в точке a граничное условие получаем в виде $\dot{E}_1 = \dot{U}_{1(0)} + \dot{I}_{1(0)} \underline{Z}_1$, а значения $\underline{A}_{11}$ и $\underline{A}_{12}$ определяются из пары уравнений:

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_{1(0)} + (\underline{A}_{11} - \underline{A}_{12}) \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{B1}}; \quad \dot{U}_{1(0)} = \underline{A}_{11} + \underline{A}_{12}. \quad (2)$$

Решение уравнений (2) дает:

$$\underline{A}_{12} = 0,5 \left[\dot{U}_{1(0)} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{B1}}{\underline{Z}_1} + 1 \right) - \frac{\underline{Z}_{B1} \cdot \dot{E}_1}{\underline{Z}_1} \right]; \quad \underline{A}_{11} = \dot{U}_{1(0)} - \underline{A}_{12}.$$

Аналогично уравнению (2) в конце второй линии при измерении напряжения $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ имеем $\dot{E}_2 = \dot{U}_{2(L-x_H)} - \dot{I}_{2(L-x_H)} \underline{Z}_2$, а пара уравнений для определения $\underline{A}_{21}$ и $\underline{A}_{22}$ принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} \left[\dot{E}_2 - \dot{U}_{2(L-x_H)} \right] \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} &= -\underline{A}_{21} e^{-\gamma_{2(L-x_H)}} + \underline{A}_{22} e^{\gamma_{2(L-x_H)}}; \\ \dot{U}_{2(L-x_H)} &= \underline{A}_{21} e^{-\gamma_{2(L-x_H)}} + \underline{A}_{22} e^{\gamma_{2(L-x_H)}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

откуда получаем:

$$\begin{aligned} \underline{A}_{22} &= 0,5 \left[\dot{E}_2 \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} + \dot{U}_{2(L-x_H)} \left(1 - \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} \right) \right] e^{-\gamma_{2(L-x_H)}}; \\ \underline{A}_{21} &= -0,5 \left[\dot{E}_2 \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} - \dot{U}_{2(L-x_H)} \left(1 + \frac{\underline{Z}_{B2}}{\underline{Z}_2} \right) \right] e^{\gamma_{2(L-x_H)}}. \end{aligned}$$

В узле d равны напряжения в начале участка 2 и в конце участка 3, а ток в конце участка 3 разделяется на ток в начале участка 2 и ток в нагрузке:

$$\dot{U}_{3(x_H-x_K)} = \dot{U}_{2(0)}; \quad \dot{I}_{3(x_H-x_K)} = \frac{\dot{U}_{2(0)}}{\underline{Z}_H} + \dot{I}_{2(0)}.$$

Поэтому уравнения для $\underline{A}_{31}$ и $\underline{A}_{32}$ принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{A}_{31} e^{-\gamma_{3(x_H-x_K)}} + \underline{A}_{32} e^{\gamma_{3(x_H-x_K)}} &= \underline{A}_{21} + \underline{A}_{22}; \\ \underline{A}_{31} e^{-\gamma_{3(x_H-x_K)}} - \underline{A}_{32} e^{\gamma_{3(x_H-x_K)}} &= \underline{A}_{21} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}} \right) + \underline{A}_{22} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

откуда:

$$\begin{aligned} \underline{A}_{31} &= 0,5 e^{\gamma_{3(x_H-x_K)}} (\underline{A}_{21} \underline{B}_1 + \underline{A}_{22} \underline{B}_2); \\ \underline{A}_{32} &= 0,5 e^{-\gamma_{3(x_H-x_K)}} (\underline{A}_{21} \underline{B}_3 + \underline{A}_{22} \underline{B}_4). \end{aligned} \quad (5)$$

Для краткости в (5) обозначены: $\underline{B}_1 = 1 + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}}$; $\underline{B}_2 = 1 + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}}$;

$$\underline{B}_3 = 1 - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}}; \quad \underline{B}_4 = 1 - \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_H} + \frac{\underline{Z}_{B3}}{\underline{Z}_{B2}}.$$

Таким образом, все комплексные постоянные решений уравнения (1) определены.

Теперь на основании граничных условий в точке c повреждения определим расстояние до этой точки x_K и сопротивление изоляции в этой точке $\underline{Z}_K$. В точке c равны напряжения в начале третьего участка и в конце первого участка, а ток в конце первого участка разделяется на ток в начале третьего участка и ток утечки:

$$\dot{U}_{1(x_K)} = \dot{U}_{3(0)}; \quad \dot{I}_{1(x_K)} = \frac{\dot{U}_{3(0)}}{\underline{Z}_K} + \dot{I}_{3(0)}.$$

Выражения для нахождения x_K и $\underline{Z}_K$ принимают вид:

$$\underline{A}_{11} e^{-\gamma_{1x_K}} + \underline{A}_{12} e^{\gamma_{1x_K}} = \underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}; \quad (6)$$

$$(\underline{A}_{11} e^{-\gamma_{1x_K}} - \underline{A}_{12} e^{\gamma_{1x_K}}) \cdot \frac{1}{\underline{Z}_{B1}} = (\underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}) \cdot \frac{1}{\underline{Z}_K} + (\underline{A}_{31} - \underline{A}_{32}) \cdot \frac{1}{\underline{Z}_{B3}}. \quad (7)$$

Теперь, подставив $\underline{A}_{31}$, $\underline{A}_{32}$ из выражений (5) в формулу (6), получаем выражение для расстояния x_K : $x_K = \frac{1}{\underline{\gamma}_1} \ln \underline{y}$, где обозначено

$$\underline{y} = \left[\frac{\underline{A}_{11} - 0,5e^{\underline{\gamma}_1 x_H} \cdot (\underline{A}_{21} \underline{B}_1 + \underline{A}_{22} \underline{B}_2)}{-\underline{A}_{12} + 0,5e^{-\underline{\gamma}_1 x_H} \cdot (\underline{A}_{21} \underline{B}_3 + \underline{A}_{22} \underline{B}_4)} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Аналогично, подставив $\underline{A}_{31}$, $\underline{A}_{32}$ в формулу (7), получим значение для поврежденного сопротивления изоляции $\underline{Z}_K = \underline{Z}_{B1} \frac{\underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}}{\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{y}} - \underline{A}_{12} \cdot \underline{y} - \underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}}$.

Вышеприведенные результаты для комплексных постоянных интегрирования и сопротивления $\underline{Z}_K$ на основании измерения напряжений в начале первого участка $\dot{U}_1(0)$ и в конце второго $\underline{A}_{11}$, ..., $\underline{A}_{32}$, x_K участка $\dot{U}_{2(L-x_H)}$ позволяют оперативно, в режиме текущего времени получить координату возможного повреждения изоляции и оценить степень повреждения.

Расчетная оценка результатов

Для оценки приведем результаты расчетов распределительной линии длиной 50 км небольшой мощности с двумя центрами питания: $\dot{E}_1 = 220$ В, $\dot{E}_2 = 225e^{j0,1}$ В и $\underline{Z}_1 = 0,5 + j3$ Ом, $\underline{Z}_2 = 0,4 + j2,5$ Ом и с параметрами линии: $\underline{Z}_{B1} = 77,13 - j61,11$ Ом, $\underline{Z}_{B2} = 80,12 - j60,1$ Ом; $\underline{\gamma}_1 = 5,335e^{j1,894} \cdot 10^{-3}$, $\underline{\gamma}_2 = 6,34e^{j1,99} \cdot 10^{-3}$. В точке $x_H = 35$ км включена нагрузка $\underline{Z}_H = 48$ Ом с напряжением $\dot{U}_H = 214,71e^{-j0,077}$ В. Стационарные напряжения на центрах питания: $\dot{U}_1 = 219,93e^{-j0,00945}$ В, $\dot{U}_2 = 222,8e^{j0,064}$ В.

На рис. 2 изображены графики распределения действующих значений напряжения и тока на участках линии в обычном стационарном режиме. Как видно, напряжение вдоль линии непрерывно изменяется с минимумом в точке d (рис. 1) подключения нагрузки. График тока имеет разрыв, величина которого соответствует действующему значению тока нагрузки. Большая часть тока нагрузки потребляется из второго центра питания.

Результаты расчета аварийного режима линии приведены на рис. 3. Признаком аварийного режима послужили измеренные напряжения на выходах центров питания: $\dot{U}_1 = 190,07e^{-j0,112}$ В, $\dot{U}_2 = 204,2e^{j0,03}$ В. Расчеты по выражениям (2)–(7) дают значения постоянных $\underline{A}_{11} = 151,69 - j617,35$,

$\underline{A}_{12} = 37,19 + j596,11$, $\underline{A}_{21} = -44,2 + j478,91$, $\underline{A}_{22} = 196,78 - j530,35$, $\underline{A}_3 = 11,92 + j344,43$, $\underline{A}_{32} = 57,26 - j418,71$. Параметры аварийного режима: сопротивление утечки изоляции $\underline{Z}_K = 4,98$ Ом произошло в точке $x_K = 20,017$ км, ток и напряжение в точке утечки составляют $\dot{I}_K = 20,3e^{-j0,82}$ А, $\dot{U}_K = 101,51e^{-j0,82}$ В. Напряжение и ток нагрузки вследствие утечки существенно уменьшились: $\dot{U}_H = 135,7e^{-j0,39}$ В, $\dot{I}_H = 2,82e^{-j0,39}$ А.

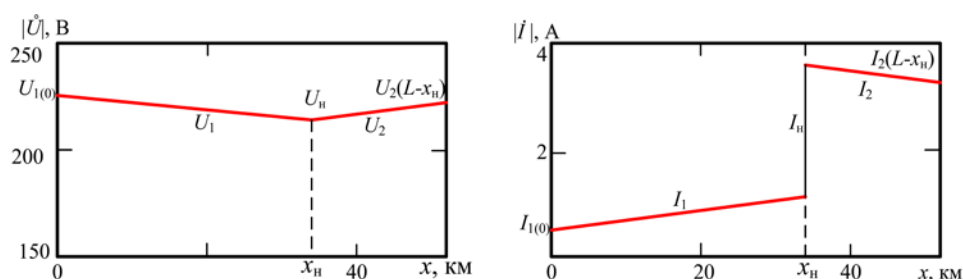


Рис. 2. Стационарный режим работы линии: а – напряжения вдоль линии; б – токи

Fig. 2. Stationary mode of line operation: a – voltages along the line; b – currents

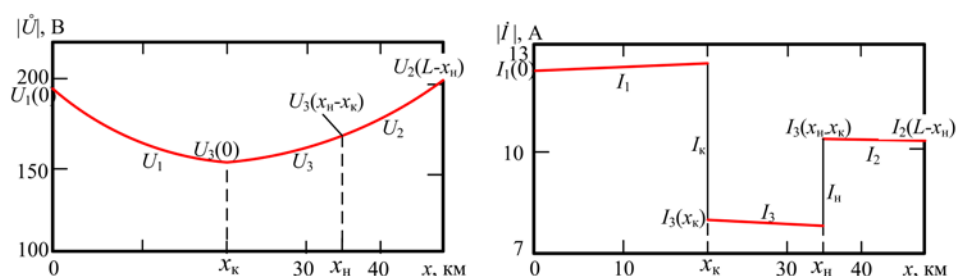


Рис. 3. Аварийный режим линии: а – напряжения вдоль линии; б – токи

Fig. 3. Emergency mode of the line: a – voltages along the line; b – currents

ВЫВОДЫ

1. Предложенный способ расчета режима распределительной линии электроэнергетической системы переменного тока позволяет в оперативном режиме отслеживать появление повреждений или несанкционированное подключение нагрузки с целью отбора мощности. Методика пригодна также для анализа линии с единственным центром питания, например при $\dot{E}_2 = 0$, $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{H2}$, и позволяет оперативно регулировать напряжение источников для управления мощностью нагрузки на необходимом уровне.

2. Перспективным направлением дальнейших исследований может быть распространение методики на разветвленные линии с несколькими

ответвлениями нагрузок и центрами питания, что характерно, например, для оффшорных электроэнергетических систем. Кроме того, на рассматриваемой модели может быть построена система контроля изоляции и избирательной защиты разветвленных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические системы. Электрические сети / В. А. Веников [и др.]. М.: Высш. шк., 1998. 511 с.
2. Аржанников, Е. А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, А. М. Чухин. М.: Энергопресс, 1998. 87 с.
3. Дементьев, В. С. Определение места повреждения силовых кабельных линий / В. С. Дементьев, В. К. Спиридонов, Г. М. Шалыт. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962. 346 с.
4. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. М.: Энергоатомиздат, 1982. 312 с.
5. Данилов, М. И. Оперативная идентификация сопротивлений проводов распределительных сетей 380 В автоматизированными системами учета / М. И. Данилов, И. Г. Романенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 2. С. 124–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-124-140>.
6. Качесов, В. Е. Параметрический метод определения расстояния до места повреждения в распределительных сетях / В. Е. Качесов, В. Ю. Лавров, А. Б. Черепанов // Электрические станции. 2003. № 8. С. 37–43.
7. Байбурин, Э. Р. Метод оперативного определения места повреждения электрической сети напряжением 6 (10) – 35 кВ / Э. Р. Байбурин // Нефтегазовое дело. 2006. № 2. С. 127. URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Bayburin/Bayburin_1.pdf.
8. Сазыкин, В. Г. Графоаналитический метод определения оптимального места расположения пункта сетевого секционирования / В. Г. Сазыкин // Изв. вузов. Электромеханика. 2022. Т. 65, № 4. С. 86–96. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-86-96>.
9. Баламетов, А. Б. Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса / А. Б. Баламетов, Э. Д. Халилов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.
10. Шлык, Ю. К. Установившийся режим работы кабельной линии с локальной неоднородностью / Ю. К. Шлык, А. В. Логунов // Промышленная энергетика. 2022. № 7. С. 2–9. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.40.77.001>.
11. Логунов, А. В. Разработка модели кабельной линии с повреждением на основе теории четырехполюсников с переменной топологией / А. В. Логунов, Ю. К. Шлык // Изв. вузов. Электромеханика. 2023. Т. 66, № 3. С. 48–54. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-3-48-54>.
12. Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14>.
13. Романюк, Ф. А. Определение зоны повреждения по уровню токов короткого замыкания / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик, М. А. Шевалдин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 396–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-396-407>.
14. Каганов, З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З. Г. Каганов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
15. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. М.: Юрайт, 2012. 701 с.

REFERENCES

1. Venikov V. A., Glazunov A. A., Zhukov L. A. [et al.] (1998) *Electrical Systems. Electrical Networks*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 511 (in Russian).
2. Arzhannikov E. A., Chukin A. M. (1998) *Methods and Devices for Determining Damage Sites on Power Transmission Lines*. Moscow, Energopress Publ. 87 (in Russian).
3. Dement'ev V. S., Spiridonov V. K., Shalyt G. M. (1962) *Determining the Location of Damage to Power Cable Lines*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 346 (in Russian).
4. Shalyt G.M. (1982) *Determining Damage Sites in Electrical Network*. Moscow, Energoizdat Publ. 312 (in Russian).
5. Danilov M. I., Romanenko I. G. (2023) Operational Identification of Resistances of Wires of 380 V Distribution Networks by Automated Accounting Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (2), 124–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-124-140> (in Russian).
6. Kachesov V. E., Lavrov V. Y., Cherepanov A. B. (2003) Parametric Method of Fault Location in Distribution Networks. *Power Technology and Engineering*, 37 (4), 262–268. <https://doi.org/10.1023/A:1026394109095>.
7. Baiburin E. R. (2006) The Method of Operational Determination of the Location of Damage to the Electrical Network with a Voltage of 6(10) – 35 kV. *Neftegazovoe Delo = Petroleum Engineering*, (2), 127. Available at: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Bayburin/Bayburin_1.pdf (in Russian).
8. Sazykin V. G., Bagmetov A. A. (2022) Grapho-Analytical Method for Determining the Optimal Location of the Network Sectioning Unit. *Russian Electromechanics*, 65 (4), 86–96. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-86-96>.
9. Balametov A. B., Halilov E. D. (2020) Simulation of Electric Networks Modes Using Steady-State and Heat Balance Equations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80> (in Russian).
10. Shlyk Y. K., Logunov A. V. (2022) Steady Mode of Operation of a Cable Line with Local Inhomogeneity, *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (7), 2–9. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.40.77.001> (in Russian).
11. Logunov A. V., Shlyk Y. K. (2023). Developing a Cable Line Model with a Fault Based on the Theory of Four-Poles with Variable Topology. *Russian Electromechanics*, 66 (3), 48–54. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-3-48-54> (in Russian).
12. Romaniuk F. A., Bulochyk E. V., Huryanchyk O. A., Kachenya V. S. (2018) The Reliability of Determining the Short Circuit Zone of the Lines of 6–35 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 5–14. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14 (in Russian).
13. Romaniuk F. A., Bulochyk E. V., Shevaldin M. A. (2018) Determination of the Fault Zone by the Level of Short-Circuit Currents. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 396–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-396-407> (in Russian).
14. Kaganov Z. G. (1990) *Electric Circuits with Distributed Parameters and Chain Circuits*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 248 (in Russian).
15. Bessonov L. A. (2012) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electric Circuits*. Moscow, Yurayt Publ. 701 (in Russian).

Received: 02 September 2024 Accepted: 11 November 2024 Published online: 31 January 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-45-57>

УДК 620.97

Энергоэффективное нейросетевое управление бесколлекторным двигателем постоянного тока

А. А. Вельченко¹⁾, С. А. Павлюковец¹⁾, А. А. Радкевич¹⁾, А. К. Ибрагим¹⁾

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

Реферат. В работе рассмотрены основные тенденции развития электродвигателей для электромобилей и мобильных роботов, а также современных методик расчета силовой электроники и электроприводов на основе искусственной нейронной сети. Представлены аспекты развития эффективности современных синхронных и бесколлекторных двигателей постоянного тока. На основе математической модели бесколлекторного двигателя постоянного тока построена архитектура блока управления с нейросетевым контроллером. Проведен упреждающий расчет нейронной сети, определены правила корректировки весовых коэффициентов. На базе упреждающего расчета построен ПИД-регулятор с самонастраивающимися параметрами с использованием нейронной сети, а также на основе нейронной сети ВР (ВР-нейросеть, от англ. ВР Neural Network) построена структурная схема системы ПИД-регулирования и получен регулятор скорости путем использования модулей MATLAB, построена S-функция активации в качестве контроллера нейронной сети ВР, основанная на математическом описании нейронной сети блока управления бесколлекторного двигателя постоянного тока. В работе подробно показана установка демультиплексора для лучшего распределения выхода S-функции. Полученная нейронная сеть инкапсулирует S-функцию весовой функции. По полученным результатам исследования нейронной сети и анализа алгоритма нейронной сети ВР составлен алгоритм управления, который используется для управления ПИД-регулятором и инкапсулируется в системе моделирования. Продемонстрированы теоретические возможности расчета на основе нейронной сети с обратной связью для построения имитационной модели адаптивного управления бесколлекторным двигателем постоянного тока.

Ключевые слова: бесколлекторный двигатель постоянного тока, искусственная нейронная сеть, ПИД-регулятор, весовой коэффициент, выходной слой, скорость обучения, нейроконтроллер, момент дискретизации, нейрон, нелинейная функция

Для цитирования: Энергоэффективное нейросетевое управление бесколлекторным двигателем постоянного тока / А. А. Вельченко [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 45–57. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-45-57>

Energy Efficient Neural Network Control of a Brushless DC Motor

А. А. Velchenko¹⁾, S. A. Pauliukavets¹⁾, A. A. Radkevich¹⁾, A. K. Ibrahim¹⁾,

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

Abstract. The paper considers the main trends in the development of electric motors for electric vehicles and mobile robots, as well as trends in the development of modern methods for calculating power

Адрес для переписки

Вельченко Анна Александровна
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
eaup@bntu.by

Address for correspondence

Velchenko Anna A.
Belarusian National Technical University
9, B. Khmel'nitsky str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-61
eaup@bntu.by

electronics and electric drives based on an artificial neural network. Aspects of the efficiency development of modern synchronous and brushless DC motors are presented. Based on the mathematical model of a brushless DC motor, the architecture of a control unit with a neural network controller is built. A proactive calculation of the neural network was carried out, and the rules for adjusting the weighting coefficients were determined. Based on proactive calculation, a PID controller with self-adjusting parameters using a neural network was built, as well as a block diagram of the PID control system was built on the basis of the BP neural network; also, a speed controller was built using MATLAB modules. Besides, an S-activation function was built as a controller of the BP neural network; the function was based on the mathematical description of the neural network of the control unit of a brushless DC motor. The paper shows in detail the installation of a demultiplexer for better distribution of the S-function output. The resulting neural network encapsulates the S-function of the weight function. Based on the results of the neural network research and analysis of the BP neural network algorithm, a control algorithm has been established that is used to control the PID controller and is encapsulated in the simulation system. The theoretical possibilities of calculation based on a feedback neural network for constructing a simulation model of adaptive control of a brushless DC motor are demonstrated.

Keywords: brushless DC motor, artificial neural network, PID controller, weighting coefficient, output layer, learning rate, demultiplexer, sampling point, neuron, nonlinear function

For citation: Velchenko A. A., Pauliukavets S. A., Radkevich A. A., Ibrahim A. K. (2025) Energy Efficient Neural Network Control of a Brushless DC Motor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (1), 45–57. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-45-57> (in Russian)

Введение

С увеличением числа владельцев автомобилей из года в год повышается нагрузка на окружающую среду. Массовое появление электромобилей решило эту проблему. В качестве направления развития транспортных средств с электрическим типом энергии электромобили занимают широкую область для внедрения новых технологий.

Тяговый электродвигатель – ключевая составляющая электромобиля. В настоящее время в качестве тягового электродвигателя для электромобилей получили наибольшее распространение двигатели переменного тока: асинхронный двигатель и синхронный двигатель с постоянными магнитами, а также двигатели постоянного тока.

Асинхронный двигатель с защитой от внешней среды является самым дешевым решением для электромобилей. Его техническое обслуживание наименее проблемно, но пульсации крутящего момента, мягкие регулировочные характеристики, низкие показатели рассеивания теплоты и невысокий КПД являются существенными недостатками для его распространения.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами обладает такими преимуществами, как малые теплотери, высокая энергоэффективность, высокая удельная мощность, простая и компактная конструкция и хорошие характеристики регулирования скорости, поэтому он широко распространен в электромобилях, где преобладает стремление к экономии электроэнергии при изменении производительности [1]. Тем не менее потери во время работы на малой скорости достигают высоких значений. Также на его стоимость влияет цена редкоземельных материалов.

Двигатель постоянного тока имеет много преимуществ, таких как высокая эффективность работы и хорошие характеристики регулирования скорости, поэтому он находит применение там, где требуется широкий диапазон регулирования скорости [2, 3]. Однако из-за недостатков, таких как наличие щеточного-коллекторного узла, сложного производственного процесса и трудоемкого технического обслуживания, постепенно проявляется слабость регулирования скорости [4]. Поэтому в последние десятилетия основной тенденцией для применения в электротранспорте стали бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ).

На протяжении последних 40 лет начали разрабатываться редкоземельные элементы для постоянных магнитов с высокой коэрцитивной и сильной антиразмагничивающей способностью, в которых кривая размагничивания является линейной и обратимой в большом диапазоне. Вместе со снижением стоимости высокоэнергетических ферритовых и неодимовых магнитов это открыло перспективы для разработки самовентилируемых электродвигателей с постоянными магнитами [5]. Технологии силовых преобразователей становились все более зрелыми с возникновением силовых полевых и биполярных транзисторов, тиристорных коммутаторов. Разработка биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-транзисторов) обеспечила надежность и стабильность схемы силового привода БДПТ [4].

Благодаря своим многочисленным преимуществам БДПТ широко используется в производстве электромобилей [6] и имеет хорошие перспективы развития. Многие преимущества БДПТ (высокий пусковой момент, высокая перегрузочная способность, малые габариты, высокий КПД, длительный срок службы, не требующий обслуживания, и удобное управление) подходят для рабочих характеристик движения электромобилей [7]. С развитием полупроводников появляется все больше и больше электронных подсистем с микроконтроллером в качестве ядра. Автомобиль постепенно превращается из механического транспорта в электрический. С применением искусственного интеллекта в электромобилях эта тенденция становится более очевидной.

В последние годы искусственные нейронные сети (ИНС) привлекают большое внимание к их возможному использованию в широком спектре областей инженерии, среди которых силовая электроника и электроприводы [8–13]. Использование ИНС мотивировано их свойствами, такими как параллельная распределенная архитектура, способность идентифицировать нелинейную системную динамику и способность к обучению, обобщению и адаптации. Все эти особенности оправдывают использование ИНС для электроприводов.

Исходя из изложенного выше видно, что проблема развития электропривода электромобилей является весьма актуальной задачей для исследования и изучения. Очевидно, что любые технологические решения, которые способны снизить стоимость электромобиля и сделать его более дешевым, чем автомобили на двигателях внутреннего сгорания, являются

весьма актуальными. Таким образом, цель статьи – разработка архитектуры блока управления БДПТ на основе нейронной сети обратного распространения ошибки.

В [14] авторами была построена математическая модель, в которой получены уравнения напряжения трехфазной обмотки бесколлекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами, электромагнитного момента бесколлекторного двигателя постоянного тока, электромагнитной мощности, ЭДС индукции каждой обмотки, дифференциальное уравнение крутящего момента servосистемы. Также в работе проведено имитационное моделирование и получены зависимости электромеханических величин: угловой скорости ротора, электромагнитного момента, тока фазы статора и угла поворота ротора от времени. Опираясь на данную математическую модель бесколлекторного двигателя постоянного тока, построим архитектуру блока управления на основе нейросетевого контроллера.

Разработка архитектуры блока управления бесколлекторным двигателем постоянного тока на основе нейронной сети

Нейронная сеть обратного распространения ошибки (ВР-нейросеть, от англ. BP Neural Network) широко используется в распознавании образов, обработке изображений, идентификации систем, подборе функций, расчетах оптимизации, оптимальном прогнозировании и адаптивном управлении. ВР-нейросеть решает проблему обучения весов соединений скрытых слоев в многослойных нейронных сетях по сравнению с однослойным персептроном, который не может решать нелинейные задачи [6].

Основная идея алгоритма ВР-нейронной сети – алгоритм наименьших квадратов. Он использует технологию градиентного поиска, чтобы минимизировать среднеквадратичную ошибку между фактическим выходным значением и ожидаемым выходным значением сети. Процесс обучения алгоритма состоит из прямого и обратного распространения. В процессе прямого распространения входная информация обрабатывается слой за слоем от входного слоя через скрытый слой и передается на выходной слой. Состояние нейронов (узлов) в каждом слое влияет только на состояние нейронов в следующем слое. Если желаемый результат не может быть получен в выходном слое, он переключится на обратное распространение, вернет сигнал ошибки по исходному пути соединения и сведет к минимуму сигнал ошибки, изменив вес нейронов в каждом слое.

Предлагаемая ВР-нейронная сеть для управления БДПТ, архитектура которой представлена на рис. 1, включает входной слой, скрытый слой и выходной слой. Скрытый слой является однослойным, содержит n нейронов, включает в себя сигмоидную функцию активации выходного слоя. На вход нейросети подаются навигационные следующие параметры: сигнал задающего воздействия X_U , сигнал измеренной контролируемой величины X_Y и сигнал рассогласования ошибки X_E . Выходной слой содержит

прогнозные коэффициенты ПИД (пропорционально-интегрально-дифференцирующего) регулятора на следующий момент времени (Y_P , Y_I , Y_D).

ВР-нейросеть использует технологию градиентного поиска, чтобы минимизировать среднеквадратичную ошибку между фактическим выходным значением и ожидаемым выходным значением сети. При обучении нейросети на ее вход подаются векторы, сформированные не из идеальных значений параметров, а из измеренных, т. е. содержащих ошибки измерения. По этой причине выходной слой содержит измеренные параметры ПИД-регулятора (Y_P^* , Y_I^* , Y_D^*), имеющие кумулятивные ошибки (e_P , e_I , e_D).

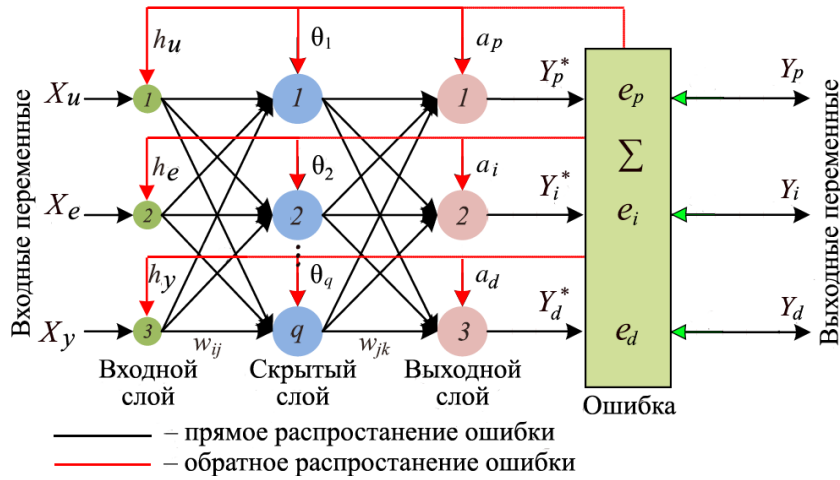


Рис. 1. Структура ВР-нейронной сети для ПИД-регулирования бесколлекторного двигателя

Fig. 1. BP neural network structure for PID controlling of brushless DC motor

Упреждающий расчет сети ВР. На этапе обучения сети имеется N обучающих выборок. Во-первых, предполагается, что сеть обучается с входными и выходными параметрами из одной из фиксированных выборок X_P и $\{d_{PK}\}$. Для удобства написания знак выборки P в формуле временно опущен, например вход j -го узла подразумеваемого слоя записывается как

$$net_{PJ} = net_J = \sum_{i=1}^M w_{ij} o_i - \theta_j. \quad (1)$$

Выход j -го узла $O_J = f(net_J)$, где $f(net_J)$ – функция активации,

$$f(net_J) = \frac{1}{1 + e^{-net_J}}. \quad (2)$$

Тогда производная функции активации (2) имеет вид

$$f'(net_J) = f(net_J)[1 - f(net_J)]. \quad (3)$$

Выход O_J -го узла будет распространяться на k -й узел через весовой коэффициент w_{JK} . Суммарный вход k -го узла выходного слоя равен

$$net_k = \sum_{j=1}^q w_{jk} o_j - \theta_k, \quad (4)$$

где q – количество узлов в скрытом слое.

Фактический выход сети k -го узла выходного слоя

$$o_k = f(net_k). \quad (5)$$

Если выход сети не согласуется с ожидаемым выходным значением d_{PK} , сигнал ошибки распространяется обратно от выхода. В процессе распространения весовой коэффициент постоянно модифицируется, чтобы результат вывода на узле выходного слоя был как можно ближе к ожидаемому выходному значению d_{PK} . После корректировки сетевого весового коэффициента выборки P ($P = 1, 2, \dots, P_i$) создаем другую пару выборок и проводим аналогичное обучение, пока не будет завершено обучение P выборок [15].

Правила корректировки сетевых весов ВР. Установку квадратичной функции ошибки для каждой пары входных и выходных режимов выборки p определим по формуле

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L (d_{PK} - o_{PK})^2. \quad (6)$$

Функция средней квадратичной ошибки системы

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (d_{PK} - o_{PK})^2 = \sum_{p=1}^P E_p, \quad (7)$$

где p – логарифм выборочной моды; L – количество выходных узлов сети.

Проблема заключается в том, как скорректировать весовой коэффициент соединения, чтобы минимизировать функцию суммы E_p . Для этой цели используется алгоритм градиентной оптимизации первого порядка, метод наискорейшего градиентного спуска.

Формула корректировки весового коэффициента выходного слоя имеет вид

$$\Delta w_{JK} = -\eta \frac{dE}{dw_{JK}}, \quad (8)$$

где η – скорость обучения, $\eta > 0$.

Производная ошибки весового коэффициента выходного слоя вычисляется по формуле

$$\frac{dE}{dw_{JK}} = \frac{dE}{dnet_K} \cdot \frac{dnet_K}{dw_{JK}}. \quad (9)$$

Сигнал ошибки обратного распространения определяется по выражению

$$\delta_K = -\frac{dE}{dnet_K} = \frac{dE}{dnet_K} = \frac{dE}{do_K} \cdot \frac{do_K}{dnet_K}. \quad (10)$$

Выражения для вычисления производных ошибок сигнала обратного распространения [12–13]:

$$\frac{dE}{do_K} = -(d_K - o_K); \quad (11)$$

$$\frac{do_K}{dnet_K} = \frac{df(net_K)}{dnet_K} = f'(net_K). \quad (12)$$

Тогда выражение (10) принимает вид

$$\delta_K = (d_K - o_K) f'(net_K) = o_K \cdot (1 - o_K) (d_K - o_K). \quad (13)$$

Производная функции активации net_K находится согласно выражению

$$\frac{dnet_K}{dw_{JK}} = \frac{d\left(\sum_{j=1}^q w_{JK} o_j\right)}{dw_{JK}} = o_j. \quad (14)$$

Формула коррекции весового коэффициента нейрона выходного слоя имеет вид

$$\Delta w_{JK} = \eta (d_K - o_K) f'(net_K) o_j = \eta \delta_K o_j = \eta o_K (1 - o_K) \cdot (d_K - o_K) o_j. \quad (15)$$

При корректировке весового коэффициента слоя, содержащего узел, изменение расчетного весового коэффициента равно

$$\begin{aligned} \Delta w_{IJ} &= -\eta \frac{dE}{dw_{IJ}} = -\frac{dE}{dnet_J} \cdot \frac{dnet_J}{dw_{IJ}} = -\frac{dE}{dnet_J} o_i = \eta \left(-\frac{dE}{do_j} \cdot \frac{do_j}{dnet_J} \right) o_i = \\ &= \eta \left(-\frac{dE}{do_j} \right) \cdot f'(net_K) o_i = \eta \delta_i o_i. \end{aligned} \quad (16)$$

Производную $\frac{dE}{do_j}$ нельзя рассчитать напрямую, поэтому ее расчет по косвенным величинам выглядит следующим образом:

$$-\frac{dE}{do_j} = -\sum_{k=1}^L \frac{dE}{dnet_K} \cdot \frac{dnet_K}{o_j} = \sum_{k=1}^L \left(-\frac{dE}{dnet_K} \right) \cdot \frac{d\left(\sum_{j=1}^q w_{JK} o_j\right)}{do_j}. \quad (17)$$

После преобразования выражения (17) получаем уравнение

$$\sum_{k=1}^L \left(-\frac{dE}{dnet_K} \right) w_{JK} = \sum_{k=1}^L \delta_K w_{JK}. \quad (18)$$

Таким образом, сигнал ошибки δ_I имеет вид

$$\delta_I = f'(net_J) \sum_{k=1}^L \delta_K w_{JK}. \quad (19)$$

После записи отметки выборки p запишем формулу для выходного слоя k

$$\Delta_p w = \eta \cdot f'(net_{PK}) \cdot (d_{DK} - o_{PK}) \cdot o_{PJ} = \eta \cdot o_{PK} \cdot (1 - o_{PK}) \cdot (d_{PK} - o_{PK}) \cdot o_{PJ}, \quad (20)$$

где o_{PK} – выход выходного слоя K ; o_{PJ} – выход скрытого слоя j .

Для скрытого выходного слоя j выражение имеет вид

$$\Delta_p w_{IJ} = \eta \cdot f'(net_{PJ}) \cdot \left(\sum_{k=1}^L \delta_{PK} w_{JK} \right) \cdot o_{PJ} = \eta \cdot o_{PJ} \cdot \left(\sum_{k=1}^L \delta_{PK} w_{JK} \right) \cdot o_{PJ}, \quad (21)$$

где o_{PJ} – выход входного слоя i .

Из результатов, полученных выше, можно вывести формулу корректировки веса связи от скрытого слоя к выходному слою

$$w_{IK}(t+1) = w_{IK(t)} + \delta_K o_J. \quad (22)$$

Если входное значение для скрытого слоя равно 1, новое пороговое значение для скрытого слоя примет вид

$$\theta_I(t+1) = \theta_J(t) + \eta \delta_J. \quad (23)$$

Новый вес от входного слоя до скрытого слоя принимает значение

$$w_{IJ}(t+1) = w_{IJ}(t) + \eta \delta_J o_I. \quad (24)$$

ПИД-регулятор с использованием нейронной сети обратного распространения ошибки. Нейронная сеть имеет возможность нелинейного произвольного выражения, а ПИД-управление с наилучшими значениями выходных параметров может быть реализовано путем изучения производительности системы. ПИД-регулятор с самонастраивающимися коэффициентами K_p , K_I и K_D может быть создан с использованием нейронной сети. Структурная схема системы ПИД-регулирования БДПТ на основе нейронной сети ВР представлена на рис. 2.

Регулятор состоит из двух частей – классического инкрементного ПИД-регулятора и нейронной сети ВР. Формула управления классическим инкрементным цифровым ПИД-регулятором

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2 \cdot e(k-1) + e(k-2)], \quad (26)$$

где K_p , K_I и K_D – соответственно пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты; $e(k)$ – разница между ожидаемым и фактическим выходом в текущий момент дискретизации (ошибка рассогласования); $u(k)$ – контролируемая величина управления БДПТ.

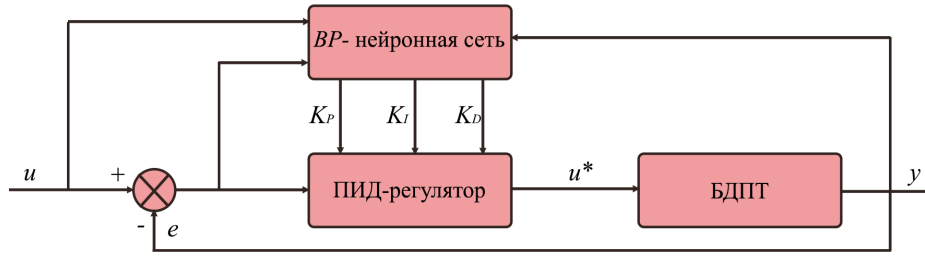


Рис. 2. Структурная схема системы ПИД-регулирования бесколлекторного двигателя постоянного тока на основе нейронной сети ВР

Fig. 2. Block diagram of a PID controlling of brushless DC motor based on a BP neural network

Когда K_p , K_i и K_d рассматриваются как регулируемые параметры в зависимости от рабочего состояния системы, формула (26) может быть описана как

$$u(k) = f[u(k-1), K_p, K_i, K_d, e(k), e(k-1), e(k-2)], \quad (27)$$

где f – нелинейная функция, связанная с K_p , K_i и K_d , $u(k-1)$, $e(k)$ и т. д.

Нейронная сеть ВР может использоваться для нахождения такого оптимального закона управления путем обучения и самообучения.

Таким образом, составим имитационную модель системы управления БДПТ с ПИД-регулятором скорости на основе ВР-нейронной сети в среде блочного моделирования MATLAB Simulink, представленную на рис. 3.

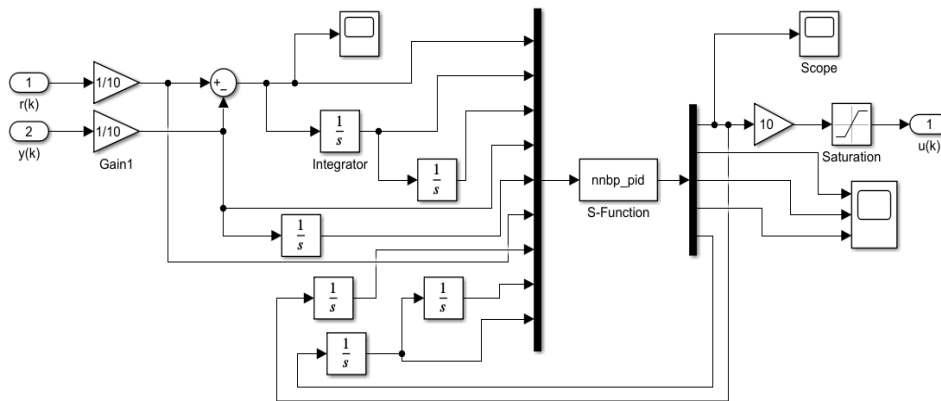


Рис. 3. Имитационная модель системы управления бесколлекторным двигателем постоянного тока с ПИД-регулятором скорости на основе ВР-нейронной сети

Fig. 3. Simulation model of the control system of a brushless DC motor with a PID speed controller based on a BP neural network

Для настройки параметров блока нейросетевого управления бесколлекторным двигателем постоянного тока в имитационной модели (рис. 3) определим S -функцию активации, основанную на математическом описании, рассмотренном в статье выше (упреждающий расчет сети ВР).

Блок S -функции S -function *nnbp_pid* (рис. 3) работает следующим образом:

Вход S -функции:

1. $u = [e(k); E(k-1); E(k-2); Y(k); Y(k-1); R(k); U(k-1)]$;
2. скрытый слой + весовой коэффициент выходного слоя ($k-2$);
3. скрытый слой + весовой коэффициент выходного слоя ($k-1$) = $[U(1); U(2); U(3); U(4); U(5); U(6); U(7)]$;

U (количество весов скрытого слоя + количество весов выходного слоя).

Целью возврата всех весовых коэффициентов с выхода на вход являются обновление матрицы весов и адаптивная настройка трех параметров ПИД-регулятора.

Эта функция имеет четыре внешние входные переменные: T , nh , $xite$, $alfa$. T вводит время выборки, nh определяет количество скрытых слоев, а также скорость обучения и коэффициент инерции в формуле коррекции весового коэффициента $xite$ и $alfa$. С целью распределения выхода S -функции необходимо установить демультиплексор, как показано на рис. 4а.

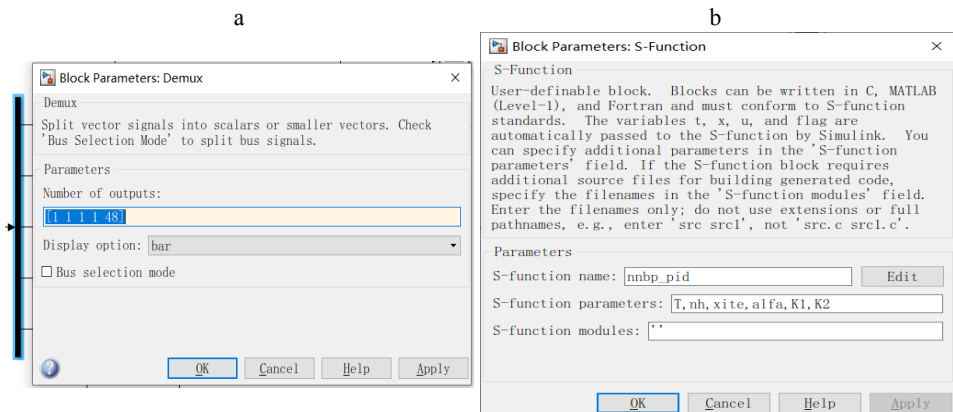


Рис. 4. Окна настроек параметров блоков нейросетевого управления бесколлекторным двигателем постоянного тока: а – демультиплексора; б – S -функции ПИД-регулятора

Fig. 4. Windows for setting parameters of neural network control blocks for brushless DC motor: а – demultiplexer; б –PID controller S -functions

При имитационном моделировании необходимо убедиться, что первыми тремя выходными переменными являются управляющие переменные u , K_P , K_I и K_D , а остальные переменные представляют собой сумму матрицы весовых коэффициентов скрытого слоя и общего количества матрицы весовых коэффициентов выходного слоя.

Следующим шагом инкапсулируем S -функцию. На рис. 4б показано окно S -функции. После завершения инкапсуляции проводятся активация S -функции и настройка нейросетевого регулятора.

В заключение проведем тестирование разработанного нейросетевого ПИД-регулятора с помощью библиотеки MATLAB “Machine learning and Deep learning”, где построим нейронную сеть обратного распростране-

ния ошибки определения коэффициентов ПИД-регулятора на основе информации имитационной модели (рис. 3), результаты распределения весовых коэффициентов и узлов связей которой показаны на рис. 5.

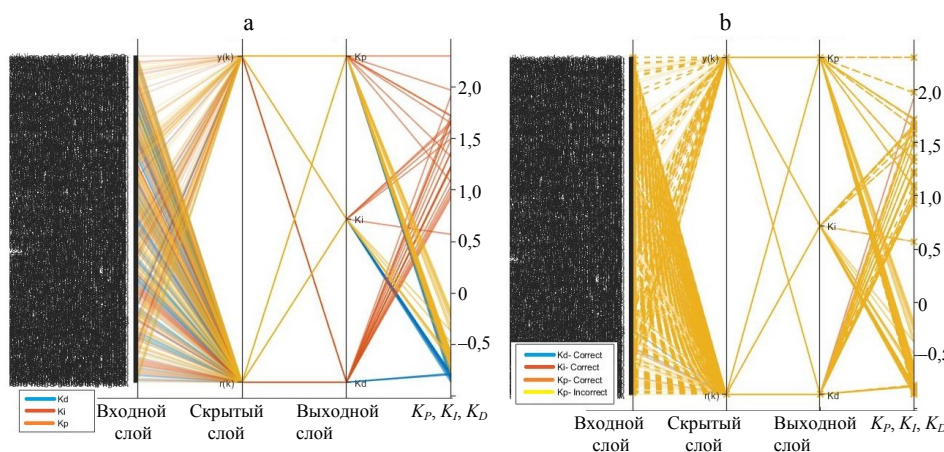


Рис. 5. а – имитационная модель четырехслойной ВР-нейронной сети ПИД-регулятора бесколлекторного двигателя постоянного тока; б – предсказания данных коэффициентов ПИД-регулятора (показаны пунктиром)

Fig. 5. a – Simulation model of neural network PID-controller of brushless DC motor; b – predictions of the given coefficients of the PID controller (shown as a dotted line)

ВЫВОДЫ

1. Получена нейросетевая архитектура, которая дает возможность создания ПИД-регулятора бесколлекторного двигателя постоянного тока с самонастраивающимися параметрами.

2. На основе упреждающего расчета нейронной сети обратного распространения ошибки создан контроллер нейронной сети для получения скорости бесколлекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами и управлением с обратной связью, который позволит улучшить характеристики управления и отклика путем изучения производительности системы.

3. Нейронная сеть инкапсулирует S -функцию весовой функции. По результатам исследования нейронной сети и анализа алгоритма нейронной сети ВР установлен алгоритм управления нейронной сетью ВР, который используется для управления ПИД-модулем и инкапсулируется в системе моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фираго, Б. И. Свойства, характеристики и параметры синхронного двигателя с постоянными магнитами при векторном и скалярном частотном управлении / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 205–218. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-205-218>.
2. Speed Control of BLDC Motor Using on DSP / G. MadhusudhanaRao [и др.] // International Journal of Engineering Science and Technology. 2010. Vol. 2, № 3. P. 143–147.

3. 单桂花, 窦月轩 运动控制系统 清华大学出版社 2002. = Er Guihua. Motion Control System / Er Guihua, Dou Yuehuan. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. P. 3–4.
4. Basheer, I. A. Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application / I. A. Basheer, M. Hajmeer // Journal of Microbiological Methods. 2000. Vol. 43, No 1. P. 3–31. [https://doi.org/10.1016/s0167-7012\(00\)00201-3](https://doi.org/10.1016/s0167-7012(00)00201-3).
5. Менжинский, А. В. Разработка аналитической модели для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой / А. В. Менжинский, С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 224–239. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-224-239>.
6. Chan, C. C. An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles / C. C. Chan, K. T. Chau // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1997. Vol. 44, No 1. P. 3–9. <https://doi.org/10.1109/41.557493>.
7. Morimoto, S. Sinusoidal Current Drive System of Permanent Magnet Synchronous Motor with Low Resolution Position Sensor / S. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda // IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting. 1996. Vol. 1. P. 9–14. <https://doi.org/10.1109/IAS.1996.556990>.
8. Batzel, T. D. An Approach to Sensorless Operation of the Permanent-Magnet Synchronous Motor using Diagonally Recurrent Neural Networks / T. D. Batzel, K. Y. Lee // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2003. Vol. 18, No 1. Pp. 100–106. <https://doi.org/10.1109/tec.2002.808386>.
9. El-Sousy, F. F. M. Hybrid H ∞ -Based Wavelet-Neural-Network Tracking Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor Servo Drives / F. F. M. El-Sousy // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57, No 9. P. 3157–3166. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2038331>.
10. Sagawa, S. Sensorless Driving Method of Permanent-Magnet Synchronous Motors Based on Neural Networks / S. Sagawa, T. Watanabe, O. Ichinokura // IEEE Transactions on Magnetics. 2003. Vol. 39, No 5. P. 3247–3249. <https://doi.org/10.1109/tmag.2003.816736>.
11. Lin, F.-J. Modified Elman Neural Network Controller with Improved Particle Swarm Optimization for Linear Synchronous Motor Drive / F.-J. Lin, L.-T. Teng, H. Chu // IET Electric Power Applications. 2008. Vol. 2, No 3. P. 201–214. <https://doi.org/10.1049/iet-epa:20070368>.
12. Li, H. A Neural-Network Based Adaptive Estimator of Rotor Position and Speed for Permanent Magnet Synchronous Motor / H. Li, J. Wang, S. S. Gu, T. Yang // ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501). Shenyang, China, April 2001. Vol. 2. P. 735–738. <https://doi.org/10.1109/icems.2001.971781>.
13. Bounded neuro-control position regulation for a geared DC motor / J. Reyes-Reyes, C. M. Astorga-Zaragoza, M. Adam-Medina, G. V. Guerrero-Ramírez // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2010. Vol. 23, No 8. P. 1398–1407. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.08.003>.
14. Вельченко, А. А. Математическая модель бесколлекторного двигателя постоянного тока на основе уравнения напряжения трехфазной обмотки / А. А. Вельченко, С. А. Павлюковец, А. А. Радкевич // Системный анализ и прикладная информатика. 2024. № 1. С. 19–25. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2024-1-19-25>.
15. Anthony, M. Neural Network Learning: Theoretical Foundations / M. Anthony, P. L. Bartlett. Cambridge University Press. Cambridge, 1999. 389 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511624216>.

Поступила 30.10.2024 Подписана в печать 08.01.2025 Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2019) Properties, Characteristics and Parameters of Permanent Magnet Synchronous Motors under Vector and Scalar Frequency Control. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 205–218. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-205-218> (in Russian).

2. Madhusudhana Rao G., Sanker Ram B. V., Smapath Kumar B., Vijay Kumar K. (2010) Speed Control of BLDC Motor Using on DSP. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (3), 143–147.
3. Er Guihua, Dou Yuexuan (2002) *Motion Control System*. Beijing, Tsinghua University Press, 3–4 (in Chinese).
4. Basheer I. A., Hajmeer M. (2000) Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application. *Journal of Microbiological Methods*, 43 (1), 3–31. [https://doi.org/10.1016/s0167-7012\(00\)00201-3](https://doi.org/10.1016/s0167-7012(00)00201-3).
5. Menzhinski A. V., Panteleev S. V., Malashin A. N. (2022) Development of an Analytical Model for Determining the Magnetic Flux of Scattering Through the Gears of the Stator of a Synchronous Electric Machine with a Fractional Gear Winding. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 224–239. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-224-239> (in Russian).
6. Chan C. C., Chau K. T. (1997) An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44 (1), 3–13. <https://doi.org/10.1109/41.557493>.
7. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y. (1996) Sinusoidal Current Drive System of Permanent Magnet Synchronous Motor with Low Resolution Position Sensor. *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, 1, 9–14. <https://doi.org/10.1109/IAS.1996.556990>.
8. Batzel T. D., Lee K. Y. (2003) An Approach to Sensorless Operation of the Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Diagonally Recurrent Neural Networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18 (1), 100–106. <https://doi.org/10.1109/tec.2002.808386>.
9. El-Sousy F. F. M. (2010) Hybrid H ∞ -Based Wavelet-Neural-Network Tracking Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor Servo Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (9), 3157–3166. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2038331>.
10. Guo H.-J., Sagawa S., Watanabe T., Ichinokura O. (2003) Sensorless Driving Method of Permanent-Magnet Synchronous Motors Based on Neural Networks. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39 (5), 3247–3249. <https://doi.org/10.1109/tmag.2003.816736>.
11. Lin F.-J., Teng L.-T., Chu H. (2008) Modified Elman Neural Network Controller with Improved particle Swarm Optimisation for Linear Synchronous Motor Drive. *IET Electric Power Applications*, 2 (3), 201–214. <https://doi.org/10.1049/iet-epa:20070368>.
12. Li H., Wang J., Gu S. S., Yang T. A Neural-Network Based Adaptive Estimator of Rotor Position and Speed for Permanent Magnet Synchronous Motor. *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems* (IEEE Cat. No.01EX501), 2, 735–738. <https://doi.org/10.1109/icems.2001.971781>.
13. Reyes J., Astorga-Zaragoza C. M., Adam-Medina M., Guerrero-Ramírez G. V. (2010) Bounded Neuro-Control Position Regulation for a Geared DC Motor, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 23 (8), 1398–1407. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.08.003>.
14. Velchenko A. A., Pauliukavets S. A., Radkevich A. A. (2024) Mathematical Model of Brushless DC Motor Based on the Voltage Equation of a Three-Phase Winding. *System Analysis and Applied Information Science*, (1), 19–25. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2024-1-19-25> (in Russian).
15. Anthony M., Bartlett P. L. (1999) *Neural Network Learning: Theoretical Foundations*. Cambridge, Cambridge University Press. 389. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511624216>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-58-75>

УДК 664.8

Исследование эффективного коэффициента диффузии и энергии активации с целью энергосбережения при конвекционной сушке

Ж. Э. Сафаров¹⁾, Ш. А. Султанова¹⁾, Г. Гунеш²⁾, А. С. Понасенко³⁾,
Д. И. Самандаров¹⁾, М. М. Пулатов¹⁾, А. М. Миркомиллов⁴⁾,
М. А. Насирова¹⁾

¹⁾Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
(Ташкент, Республика Узбекистан),

²⁾Стамбульский технический университет (Стамбул, Турецкая Республика),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾Ташкентский химико-технологический институт (Ташкент, Республика Узбекистан)

Реферат. В данном исследовании проведена работа по расчету и математическому моделированию эффективного коэффициента диффузии и энергии активации при конвективной сушке продукта, рассчитан коэффициент его усадки при разных температурах. Эффективный коэффициент диффузии рассчитывался с использованием закона диффузии Фика, разработанного для конечной цилиндрической геометрии. С использованием уравнения эффективного коэффициента диффузии для температур воздуха 45, 55 и 65 °C получены следующие значения: $2,02 \cdot 10^{-10}$, $5,05 \cdot 10^{-10}$ и $8,08 \cdot 10^{-10}$ м²/с соответственно. Энергия активации рассчитана как 61,1 кДж/моль с использованием наклона графика $\ln(D_{\text{эф}})^{-1}/T$. Установлено, что коэффициенты усадки продукта при температурах воздуха для сушки 45; 55 и 65 °C составляют примерно 23, 32 и 40 % соответственно. Чтобы найти наиболее подходящую сетчатую структуру модели, было проведено исследование независимости сети с использованием средних значений влажности с точностью до 0,001. Нелинейные одновременные уравнения тепло- и массопереноса для осушающего воздуха 45, 55 и 65 °C решаются методом конечных элементов (MATLAB) с начальными и граничными условиями. Уравнения решаются с точностью до 0,001 для 30-минутных временных интервалов. Начальные условия, использованные в опыте, и теплофизические свойства продукта подробно представлены в таблицах и на графиках. Данные, полученные экспериментальным путем и методом математических вычислений, проанализированы, и было установлено, что результаты совместимы друг с другом. Согласно полученному результату математическая модель, выражающая одновременный тепломассоперенос, может быть использована для прогнозирования распределения влаги в зависимости от температуры в продукте при сушке.

Ключевые слова: математическая модель, эффективный коэффициент диффузии, коэффициент усадки, энергия активации, температура, криволинейный регрессионный анализ

Для цитирования: Исследование эффективного коэффициента диффузии и энергии активации с целью энергосбережения при конвекционной сушке / Ж. Э. Сафаров [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 58–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-58-75>

Адрес для переписки

Понасенко Андрей Святославович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 276-39-23
buii@bntu.by

Address for correspondence

Ponassenko Andrey S.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 276-39-23
buii@bntu.by

Research of the Effective Diffusion Coefficient and Activation Energy for the Purpose of Energy Saving during Convection Drying

J. E. Safarov¹⁾, Sh. A. Sultanova¹⁾, G. Gunes²⁾, A. S. Ponasenko³⁾,
D. I. Samandarov¹⁾, M. M. Pulatov¹⁾, A. M. Mirkomilov⁴⁾, M. A. Nasirova¹⁾

¹⁾Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
(Tashkent, Republic of Uzbekistan),

²⁾Istanbul Technical University (Istanbul, Republic of Turkey),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾Tashkent Institute of Chemical Technology (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Abstract. In this study, the calculation and mathematical modelling of effective diffusion coefficient and activation energy in convective drying of a product were investigated. The shrinkage coefficient for different temperatures was also calculated. The effective diffusion coefficient was calculated using Fick's law developed for finite cylindrical geometry. Using the effective diffusion coefficient equation for air temperatures of 45, 55 and 65 °C, the results were obtained as $2.02 \cdot 10^{-10}$, $5.05 \cdot 10^{-10}$ and $8.08 \cdot 10^{-10}$ m²/s, respectively. The activation energy was calculated as 61.1 kJ/mol using the slope of the graph $\ln(D_{\text{eff}})^{-1}/T$. The product shrinkage coefficients at drying air temperatures of 45, 55 and 65 °C were found to be approximately 23, 32 and 40 %, respectively. In order to find the most suitable mesh structure of the model, a network independence study was carried out using average moisture content values with an accuracy of 0.001. Nonlinear simultaneous heat and mass transfer equations for 45, 55 and 65 °C dehumidifying air are solved by the finite element method (MATLAB) with initial and boundary conditions. The equations are solved with a tolerance value of 0.001 for thirty minutes time steps. The initial conditions used in the analyses and the thermophysical properties of the product are detailed in tables and graphs. The data obtained from the experimental and numerical solution were compared and it was seen that the results were compatible with each other. According to this result, a mathematical model expressing simultaneous heat and mass transfer can be used to predict the moisture and temperature distribution in the product during drying.

Keywords: mathematical model, effective diffusion coefficient, shrinkage coefficient, activation energy, temperature, curvilinear regression analysis

For citation: Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Gunes G., Ponasenko A. S., Samandarov D. I., Pulatov M. M., Mirkomilov A. M., Nasirova M. A. (2025) Research of the Effective Diffusion Coefficient and Activation Energy for the Purpose of Energy Saving during Convection Drying. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (1), 58–75. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-58-75> (in Russian)

Введение

Сушка представляет собой сложный диффузионный процесс, при котором процессы тепло- и массообмена происходят одновременно. Процесс воздушной сушки протекает с разной скоростью и состоит, как правило, из периода постоянной скорости сушки, за которой следует период ее уменьшения. В период постоянной скорости сушки поверхность продукта покрыта водой. По мере испарения воды с поверхности происходит массоперенос влаги. Скорость воздуха, температура и относительная влажность являются основными факторами, влияющими на скорость сушки. В период падения скорости сушки влагоперенос контролируется внутренними параметрами массопереноса, такими как капиллярный поток, диффузия жидкости и пара [1–3].

Один или несколько из этих процессов могут происходить одновременно в период падения скорости сушки. Температура воздуха, скорость воздушного потока, химический состав, физическая структура и толщина продукта влияют на скорость сушки. В гигроскопичных материалах наблюдаются два периода уменьшения скорости. В течение первого периода снижения скорости площадь влажной поверхности уменьшается в зависимости от того, как влага продукта поднимается в воздух. При достижении равновесной влажности на поверхности продукта начинается второй период снижения скорости и внутри продукта происходит испарение связанной влаги [4–7].

Масса воды, переносимая испарением с единицы площади в единицу времени, определяет скорость сушки. Когда начинают сушить влажный продукт, поверхность которого покрыта пленкой воды, скорость сушки равна скорости испарения с поверхности воды. Пока скорость, температура и влажность воздуха остаются постоянными, скорость сушки не изменяется. Влажность в момент, когда водяная пленка на поверхности продукта начинает исчезать, называется первой критической влажностью. Период постоянной скорости – это период сушки, который длится до тех пор, пока не уменьшится критическая влажность. Изменение абсолютной влажности и скорости сушки продукта во времени показано на рис. 1 [8].

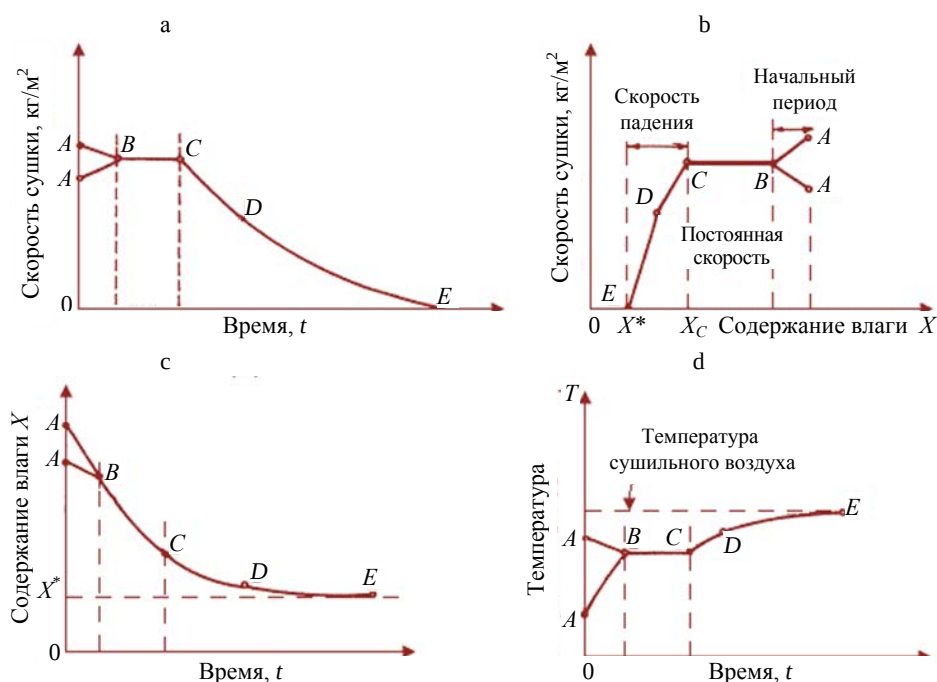


Рис. 1. а – изменение скорости сушки в зависимости от времени;
б – то же в зависимости от влажности; с – изменение влажности в зависимости от времени;
д – изменение температуры в зависимости от времени

Fig. 1. а – change in drying rate over time; б – change in drying rate depending on humidity;
с – change in humidity over time; д – change in temperature over time

Влажность продукта постоянно снижается в разные периоды времени. В то же время температура поверхности продукта постоянна в диапа-

зоне BC (скорость воздуха, влажность, температура), так как внешние условия постоянны в зависимости от влажности воздуха. Это происходит за счет плавного испарения жидкости. В области BC теплообмен уравновешивается массопереносом:

AB : процесс нагревания или охлаждения влажного продукта до достижения равновесия;

BC : стабильное испарение жидкости в период постоянной скорости сушки;

A : первая критическая точка, при которой на поверхности влажного продукта начинают образовываться сухие участки;

CD : первый период падающей скорости сушки;

D : вторая критическая точка, при которой влага испарилась с поверхности продукта;

DE : второй период падающей скорости сушки.

При конвективной сушке поток горячего воздуха направляется к материалу в сушильной установке, позволяя теплоте передаваться материалу путем конвекции, удаляя при этом испаряющуюся воду из окружающей среды. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в продукте не образуется равновесная влажность, зависящая от относительной влажности и температуры воздуха. Исходя из поставленной в данной научной работе задачи эффективный коэффициент диффузии и энергии активации при конвективной сушке можно рассчитать и смоделировать в такой последовательности.

Расчет содержания влаги в материале

Содержание влаги в продукте в пересчете на сухую и влажную основу:

$$W_{co} = \left(\frac{W_s}{m_K} \right) = \left(\frac{m - m_K}{m_K} \right); \quad (1)$$

$$W_{bo} = \left(\frac{m_s}{m_s + m_K} \right) \cdot 100, \quad (2)$$

где W_{co} – содержание влаги в продукте на сухую основу; W_{bo} – то же на влажную основу; m – исходный вес продукта, г; m_s – масса воды в продукте, г; m_K – то же сухого продукта, г.

Скорость сушки (СС), которая представляет собой изменение влажности высушиваемого продукта в единицу времени, может быть выражена как

$$CC = \left(\frac{W_t - W_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) \cdot 100, \quad (3)$$

где W_t – влажность продукта при t ; $W_{t+\Delta t}$ – то же при $t + \Delta t$ в пересчете на сухую массу, г воды / г сухого вещества.

Модели сушки определяются в терминах безразмерного отношения влажности ($W_{\text{бв}}$). Для расчета содержания влаги в сухой основе, полученного в результате эксперимента по нахождению статистических параметров, запишем

$$W_{\text{бв}} = \frac{W_t - W_e}{W_b - W_e}, \quad (4)$$

где $W_{\text{бв}}$ – безразмерные влажности; W_e – равновесная влажность в конце сушки, г воды / г сухого вещества; W_b – начальная влажность, г воды / г сухого вещества.

В исследовании упрощено безразмерное соотношение влажности и использовано значение

$$W_{\text{бв}} = W_t / W_b.$$

Эффективный коэффициент диффузии находится с использованием значения наклона (e), полученного при построении графика зависимости $\ln(W_{\text{бв}})$ от времени

$$e = \left(\frac{\pi^2 D_{\text{эф}} t}{4L^2} \right). \quad (5)$$

Энергия активации E_0 (кДж/моль), представляющая собой начальную энергию химических реакций, рассчитывается по уравнению

$$D_{\text{эф}} = D_0 \exp\left(\frac{E_0}{RT}\right), \quad (6)$$

где R – универсальная газовая постоянная ($8,314 \cdot 10^{-3}$ кДж/(моль · К); D_0 – экспоненциальный множитель уравнения Аррениуса ($\text{м}^2/\text{с}$); T – температура осушающего воздуха.

Эффективный коэффициент диффузии рассчитывается с использованием закона диффузии Фика, разработанного для конечной цилиндрической геометрии. В используемом выражении предполагается наличие постоянного коэффициента диффузии и переноса влаги путем диффузии. Эффективный коэффициент диффузии можно рассчитать с помощью уравнения [10]

$$W_{\text{бв}} = \frac{W_t - W_e}{W_b - W_e} = \frac{8r^2}{l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \exp\left(-(\lambda_i^2 + \beta_j^2) \frac{D_{\text{эф}} t}{r^2}\right), \quad (7)$$

где $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; r – радиус; l – характерная длина, м; t – время сушки, с; λ_i – корень функции Бесселя,

$$\beta_j = \frac{(2j-1)\pi r}{2l} \text{ при } j = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Для длительного времени высыхания можно использовать только первый член серийного решения [11]:

$$W_{\text{об}} = \frac{W_t - W_e}{W_i - W_e} = \frac{32}{\lambda_i^2 \pi^2} \exp\left(-(\lambda_i^2 + \beta_i^2) \frac{D_{\text{эф}} t}{r^2}\right); \quad (9)$$

$$\ln(W_{\text{об}}) = \ln\left(\frac{32}{\lambda_i^2 \pi^2}\right) - \left(-(\lambda_i^2 + \beta_i^2) \frac{D_{\text{эф}} t}{r^2}\right). \quad (10)$$

Эффективный коэффициент диффузии получают из кривой изменения времени сушки с $\ln(W_{\text{об}})$, полученной в результате экспериментального исследования. Значение наклона рассчитывается из графика изменения значений $\ln(W_{\text{об}})$, приведенных в (10), в зависимости от времени высыхания

$$\text{Наклон} = \frac{5,7831 + \beta_i^2 D_{\text{эф}}}{r^2}. \quad (11)$$

Таким образом, эффективный коэффициент диффузии определен с использованием метода наклона.

Расчет скорости сушки

Экспериментальный расчет эффекта усадки представляет собой довольно сложную задачу. Поэтому необходимо произвести оценку степени усадки. В данном исследовании использовался метод линейного распределения скорости усадки в процессе сушки. Скорость усадки в любой точке продукта

$$u(x) = u(b) \frac{x}{b} \quad (12)$$

определяется как значение скорости на поверхности и задается уравнением

$$u(b) = \frac{b - b_2}{\Delta t}, \quad (13)$$

где b – начальная половина толщины; b_2 – половина толщины продукта в следующий раз [12].

Для расчета полутолщины продукта в любой момент времени и эффективного коэффициента диффузии за счет эффекта усадки можно использовать следующее выражение, которое получается в зависимости от содержания влаги в этот момент [13]:

$$b = b_0 \left[\frac{\rho_m + W_{\rho_s}}{\rho_m + W_0 W_{\rho_s}} \right], \quad \frac{D_{\text{эф}}}{D_{\text{эф}}} = \frac{b_0}{b_t}, \quad (14)$$

где $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии, м²/с; $D_{\text{эф}}$ – коэффициент, полученный в результате эффекта сушки, использованный в численном анализе, м²/с; b_0 – половина толщины продукции в первый момент и половина толщины продукции во время b_t [14].

Тепловая эффективность выражается как отношение энергии, затраченной на испарение воды из продукта, к общей энергии, затраченной в сушильной установке [15]:

$$\eta = \frac{W_m \lambda}{E_T}, \quad (15)$$

где λ – энтальпия испарения, кДж/кг; E_T – энергия активации, кДж/моль; W_m – количество испарившейся воды, кг.

Эффект усадки негативно сказывается на качестве продукции. Поэтому его следует учитывать в процессе сушки. Коэффициент усадки (S_b) можно получить с помощью следующего уравнения [16]:

$$S_b = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \cdot 100. \quad (16)$$

Расчет эффективного коэффициента диффузии и энергии активации

Рассчитаны эффективные коэффициенты диффузии тыквы для различных температур. С помощью уравнения (5) эффективный коэффициент диффузии для температур воздуха 45, 55 и 65 °C равен $2,02 \cdot 10^{-10}$, $5,05 \cdot 10^{-10}$ и $8,08 \cdot 10^{-10}$ м²/с соответственно.

Линейное уравнение зависимости эффективного коэффициента диффузии от температуры $D_{\text{эф}} = 0,303T^{-10,1}$ и коэффициент регрессии $R^2 = 1$. Как видно из рис. 2, эффективный коэффициент диффузии также увеличивается при повышении температуры воздуха для сушки.

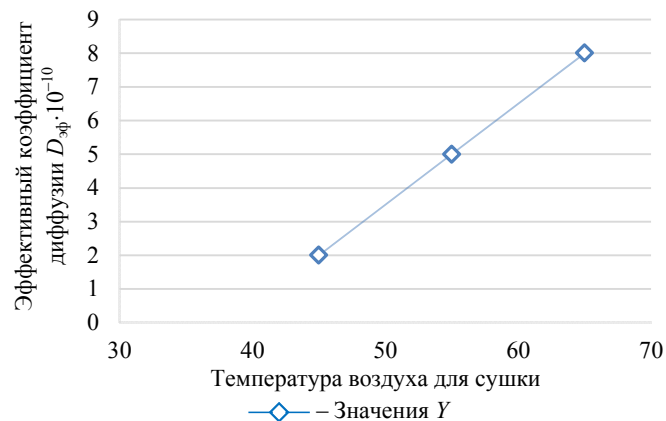


Рис. 2. Изменение эффективного коэффициента диффузии в зависимости от температуры осушающего воздуха

Fig. 2. Variation of effective diffusion coefficient as a function of drying air temperature

С использованием наклона графика $\ln(D_{\text{эф}})^{-1}/T$, показанного на рис. 3, и (6) была рассчитана энергия активации (61,1 кДж/моль). Уравнение (16) использовалось для расчета коэффициента усадки продукта. Установлено,

что коэффициенты усадки продукта при температуре воздуха для сушки 45, 55 и 65 °С составляют примерно 23, 32 и 40 % соответственно.

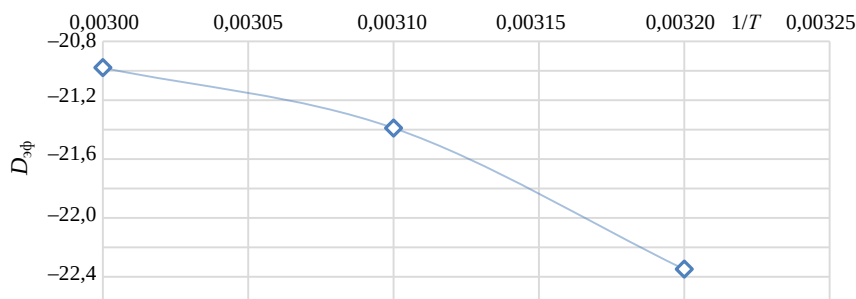


Рис. 3. Изменение эффективного коэффициента диффузии в зависимости от температуры ($1/T$)

Fig. 3. Variation of effective diffusion coefficient as a function of temperature ($1/T$)

При повышении температуры на каждые 10 °С объемное изменение продукта составляло примерно 8,5 %. На рис. 4 показана зависимость между влажностью продукта и изменением коэффициента усадки после 6 ч сушки ломтиков тыквы при различных температурах. На основании полученных результатов можно утверждать, что температура воздуха при сушке является эффективным параметром усадки продукта.

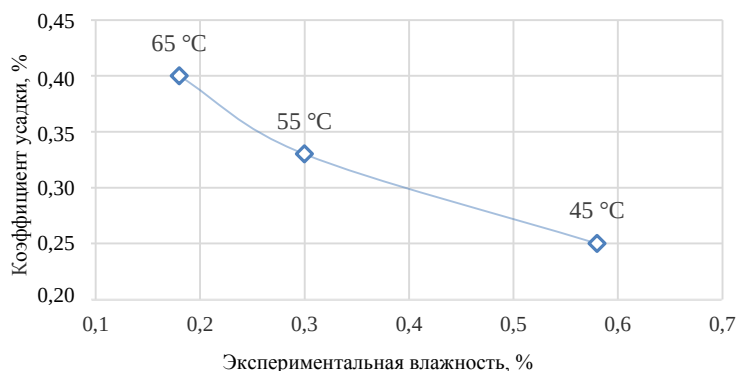


Рис. 4. Изменение влажности с коэффициентом усадки в конце сушки при разных температурах

Fig. 4. Variation of moisture content with shrinkage coefficient at the end of drying at different temperatures

Математическая модель и проверочный анализ процесса сушки

В данном исследовании принудительной конвекционной сушки использовалась двумерная осесимметричная модель для определения одновременных уравнений тепло- и массопереноса (рис. 5). Теоретическое исследование реализуется путем моделирования полусреза поперечного сечения цилиндрического образца.

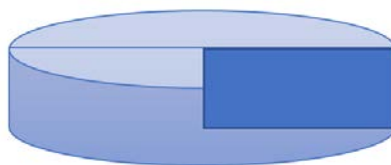


Рис. 5. Осесимметричная модель

Fig. 5. Axisymmetric model

При анализе процесса сушки сделаны следующие предположения:

- изначально содержание влаги и значение температуры в продукте принимались однородными (равномерными);
- теплоперенос в продукте осуществляется кондуктивным путем, а массоперенос жидкости – диффузионным;
- происходит передача теплоты от воздуха к продукту за счет конвекции и теплопроводности, диффузия от твердого тела к воздуху и перенос массы за счет конвекции;
- учитывается эффект усадки (эффективный коэффициент диффузии за счет эффекта усадки) продукта во время сушки;
- влияние радиации не учитывается;
- теплофизические свойства воздуха считались постоянными в течение периода сушки.

Прежде всего, чтобы найти наиболее подходящую сетчатую структуру модели, было проведено исследование независимости сети с использованием средних значений влажности с точностью до 0,001. Нелинейные одновременные уравнения тепло- и массопереноса для осушающего воздуха 45, 55 и 65 °С решаются методом конечных элементов (MATLAB) с начальными и граничными условиями (со значением допуска 0,001 для 30-минутных временных шагов). Исходные условия, использованные при анализе, и теплофизические свойства продукта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства тыквы и экспериментальные условия сушки
Thermophysical properties of pumpkin and experimental drying conditions

Параметр	Единица	Источник
Плотность продукта, кг/м ³	980	[12]
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К)	$0,006M + 0,120$	[17]
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	$0,811M^2 - 24,75 + 1742$	[17]
Энтальпия испарения, Дж/кг	$0,23 \cdot 10^7$	[18]
Скорость воздуха, м/с	0,5; 0,7; 1,0	[19]
Начальная влажность продукта, %	72	[19]
Температура сушки, °С	45, 55, 65	[19]

Модель проверена путем сравнения значений содержания влаги и температуры, полученных в результате экспериментов и математическим вычислением. На рис. 6 приведено сравнение значений влагосодержания, полученных в результате эксперимента, со средними значениями влагосодержания, полученными в результате математического вычисления при различных темпера-

турах сушки воздуха. Установлено, что существует разница примерно 2,2; 2,9 и 6,8 % между значениями, полученными в результате эксперимента и математического вычисления, при температурах 45, 55 и 65 °C.

Численный анализ также проводился без учета усадочной ситуации. Результаты моделей с усадкой и без нее представлены на рис. 5. Что касается содержания влаги в продукте, то получена разница примерно 2 % между численными результатами условий усадки и без усадки [20].

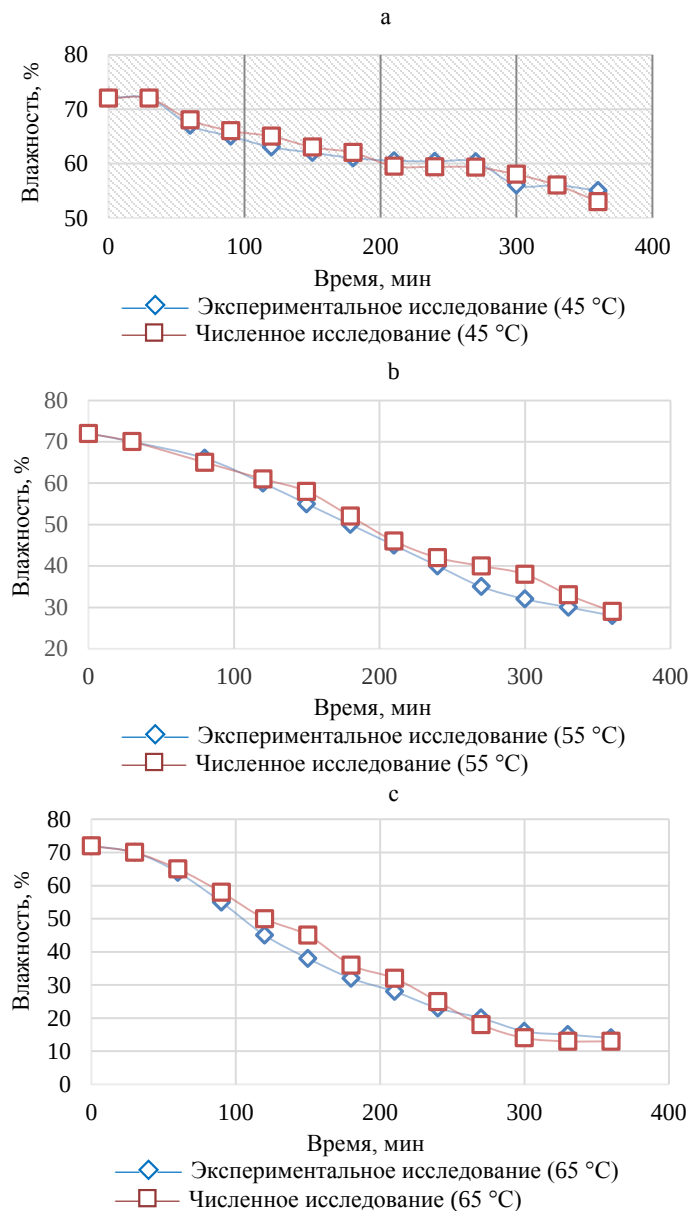


Рис. 6. Изменение влажности продукта в процессе сушки: а – 45 °C; б – 55 °C; в – 65 °C

Fig. 6. Time variation of a product moisture content during the drying process:
a – 45 °C; b – 55 °C; c – 65 °C

Как видно из рис. 6, в отличие от других сравнений регрессионный анализ выполнен для графических изменений результатов двух сравниваемых методов. Здесь для линейных кривых используется простая модель линейной регрессии ($y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$; β_1 – точка отсечки регрессии; ε – значение ошибки, наклон регрессии). В некоторых случаях связь между переменными может быть нелинейной. В этих случаях используется полиномиальная регрессия ($\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2^2 + \dots + \beta_i x_i^n + \varepsilon$).

Коэффициент регрессии показывает нам, сколько процентов зависимых переменных (y – температура, влажность) в модели можно объяснить независимыми переменными (x – время).

По результатам регрессионного анализа влагосодержания, полученного для температуры 45 °С (табл. 2 и 3), установлено, что он является более точной оценкой изменения влагосодержания в зависимости от времени сушки, так как значение численного исследования R^2 ближе к 1. По результатам регрессионного анализа, выполненного для 55 °С в тех же условиях (табл. 4–6), видно, что экспериментальное исследование дало лучшие результаты. По результатам регрессионного анализа для 65 °С видно, что экспериментальные данные имеют лучшую оценку содержания влаги (табл. 7, 8).

Таблица 2

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
экспериментального исследования в зависимости от времени при 45 °С**
**Linear regression analysis of the moisture content of the experimental study
as a function of time at 45 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R^2	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	183,906	183,906	702,26	98,46	0,51	$y = 71,30 - 0,03351x$
Ошибка	11	2,881	0,262				
Общий	12	186,786					
<i>Примечание.</i> В табл. 2–14 даны обозначения: СС – степени свободы; ССК – скорректированная сумма квадратов; ССКв – скорректированные средние квадраты; ЗС – значение статистики; R^2 – коэффициент регрессии; СО – стандартная ошибка.							

Таблица 3

**Линейный регрессионный анализ влажности численного исследования
в зависимости от времени при 45 °С**
**Linear regression analysis of the moisture content of the numerical study at 45 °C
as a function of time at 45 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R^2	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	307,97	307,97	1266,84	99,14	0,49	$y = 71,86 - 0,04336x$
Ошибка	11	2,674	0,243				
Общий	12	310,644					

Таблица 4

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
экспериментального исследования в зависимости от времени при 55 °С**
**Linear regression analysis of the moisture content of the experimental study
as a function of time at 55 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	896,14	896,14	2837,58	99,61	0,56	$y = 71,50 - 0,07397x$
Ошибка	11	3,474	0,316				
Общий	12	899,614					

Таблица 5

**Линейный регрессионный анализ влажности численного исследования
с эффектом усадки при 55 °С во времени**
**Linear regression analysis of moisture content of a numerical study
with shrinkage effect at 55 °C over time**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	882,421	882,421	341,13	96,88	1,6	$y = 69,71 - 0,07340x$
Ошибка	11	28,454	2,587				
Общий	12	910,875					

Таблица 6

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
в зависимости от времени безусадочного численного исследования при 55 °С**
**Linear regression analysis of moisture content as a function of time
of shrinkage-free numerical study at 55 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	941,281	941,281	434,4	97,53	1,47	$y = 69,03 - 0,07581x$
Ошибка	11	23,836	2,167				
Общий	12	965,117					

Таблица 7

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
в экспериментальном исследовании в зависимости от времени при 65 °С**
**Linear regression analysis of moisture content in the experimental study
as a function of time at 65 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	2119,87	2119,87	5717,06	99,81	0,6	$y = 72,66 - 0,1138x$
Ошибка	11	4,08	0,37				
Общий	12	2123,94					

Таблица 8

**Линейный регрессионный анализ содержания влаги
в численном исследовании в зависимости от времени при 65 °С**
**Linear regression analysis of moisture content in a numerical study
as a function of time at 65 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	1	1272,54	1272,54	318,95	96,67	1,99	$y = 68,69 - 0,8814x$
Ошибка	11	43,89	3,99				
Общий	12	1316,42					

На рис. 7 показаны изменения температуры в центре продукта, полученные экспериментально и математически для каждой температуры воздуха при сушке. Средняя разница между значениями температуры продукта, полученными в результате экспериментального и математического вычисления, составила 7, 9 и 5 % для температур воздуха сушки 45, 55 и 65 °С соответственно. Значения влажности и температуры, которые являются результатом математического решения, и данные, полученные в результате эксперимента, совместимы друг с другом.

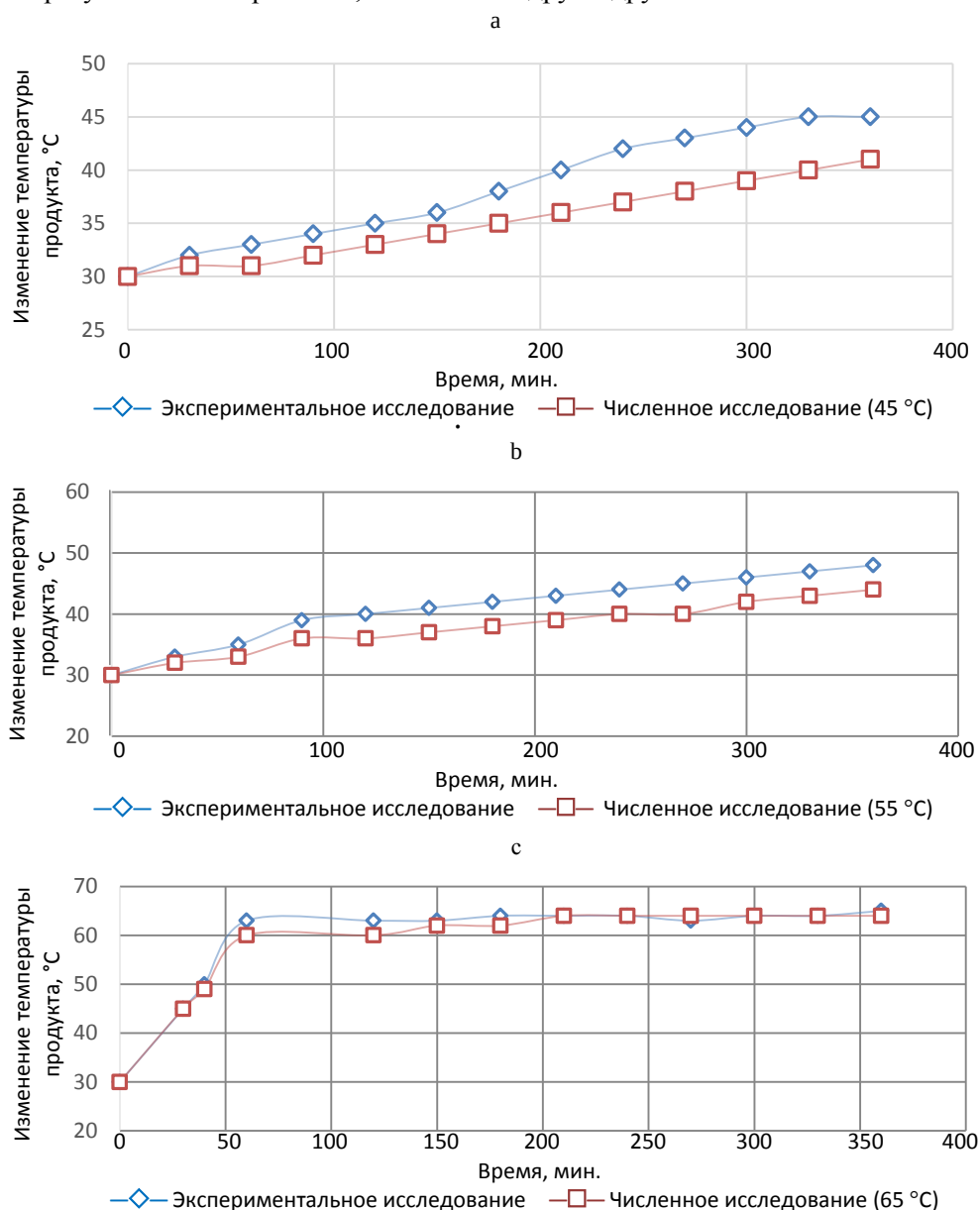


Рис. 7. Изменение температуры продукта во время сушки

Fig. 7. Product temperature change during drying

Криволинейный регрессионный анализ температуры продукта для экспериментальных и математических исследований при температурах 45, 55 и 65 °C приведен в табл. 9–14. Видно, что результаты экспериментального исследования для 45 °C и регрессионного анализа математического исследования для 55 и 65 °C сопоставимы.

Таблица 9

Криволинейный регрессионный анализ зависимости температуры экспериментального исследования от времени при 45 °C

Curvilinear regression analysis of the experimental study temperature dependence on time at 45 °C

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R^2	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	193,19	64,3996	151,25	98,06	0,65	$y = 21,49 - 0,1640x - 0,000699x^2 + 0,000001x^3$
Ошибка	9	3,832	0,4258				
Общий	12	197,031					

Таблица 10

Криволинейный регрессионный анализ зависимости температуры численного исследования от времени при 45 °C

Curvilinear regression analysis of the numerical study temperature dependence on time at 45 °C

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R^2	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	292,5	97,4999	145,46	97,98	0,81	$y = 21,47 + 0,2120x - 0,000920x^2 + 0,000001x^3$
Ошибка	9	6,032	0,6703				
Общий	12	298,532					

Таблица 11

Криволинейный регрессионный анализ зависимости температуры экспериментального исследования от времени при 55 °C

Curvilinear regression analysis of the experimental study temperature dependence on time at 55 °C

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R^2	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	396,673	132,22	106,22	97,25	1,11	$y = 23,12 + 0,2758x - 0,001289x^2 + 0,000002x^3$
Ошибка	9	11,204	1,245				
Общий	12	407,877					

Таблица 12

Криволинейный регрессионный анализ зависимости температуры численного исследования в зависимости от времени при 55 °C

Curvilinear regression analysis of the numerical study temperature dependence on time at 55 °C

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R^2	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	661,659	220,553	120,27	97,57	1,35	$y = 22,72 + 0,3180x - 0,001404x^2 + 0,000002x^3$
Ошибка	9	16,505	1,834				
Общий	12	678,163					

Таблица 13

**Криволинейный регрессионный анализ температуры
экспериментального исследования в зависимости от времени при 65 °С**

**Curvilinear regression analysis of experimental study
temperature dependence on time at 65 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	765,366	255,122	27,09	90,03	3,06	$y = 26,10 + 0,4330x - 0,002145x^2 + 0,000003x^3$
Ошибка	9	84,771	9,419				
Общий	12	850,137					

Таблица 14

**Криволинейный регрессионный анализ температуры
численного исследования в зависимости от времени при 65 °С**

**Curvilinear regression analysis of numerical study
temperature dependence on time at 65 °C**

Параметр	СС	ССК	ССКв	ЗС	R ²	СО	Уравнение регрессии
Регрессия	3	1026,71	342,238	34,04	91,9	3,17	$y = 265,90 + 0,4331x - 0,002087x^2 + 0,000003x^3$
Ошибка	9	90,5	10,055				
Общий	12	1117,21					

ВЫВОДЫ

1. Эффективный коэффициент диффузии при температуре воздуха 45, 55 и 65 °С составил $2,02 \cdot 10^{-10}$, $5,05 \cdot 10^{-10}$ и $8,08 \cdot 10^{-10}$ м²/с. В соответствии с этим результатом определено, что температура воздуха для сушки является эффективным параметром.

2. Энергия активации – это количество энергии, которое необходимо преодолеть, чтобы произошла химическая реакция. В этом исследовании энергия активации продукта рассчитана как 61,1 кДж/моль с использованием наклона графика $\ln(D_{\text{эф}})^{-1}/T$.

3. Коэффициент усадки рассчитан для определения изменения объема продукта, причем наибольшее изменение объема происходило при 65 °С. По коэффициенту усадки, рассчитанному в конце сушки, и по экспериментальному графику влажности видно, что температура воздуха для сушки оказывает влияние на изменение объема продукта. Установлено, что коэффициент усадки в продукте увеличивался одновременно с повышением температуры воздуха сушки.

4. Установлено, что с увеличением температуры сушильного воздуха время сушки соответственно уменьшается и процесс сушки происходит быстрее (преимущественно в период снижения скорости для всех температур).

5. Сопоставление данных, полученных при экспериментальном и математическом вычислении, подтверждает их совместимость. Согласно этому математическая модель, выражающая одновременный тепломассоперенос, может быть использована для прогнозирования распределения влаги и температуры в продукте при сушке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронова, Н. П. Решение одной задачи оптимального управления процессом тепломассопереноса / Н. П. Воронова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2004. № 5. С. 76–78. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2004-0-5-76-78>.
2. Analysis of the Process of Mass Transfer During Drying / A. R. Tarawade, B. Özçelik, Sh. A. Sultanova, J. E. Safarov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 848. Art. 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012003>.
3. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. Объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>.
4. Heldman, D. R. Principles of food Processing / D. R. Heldman, R. W. Hartel. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc., 1999. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4584-6>.
5. Geankoplis, C. J. Transport Processes and Unit Operations / C. J. Geankoplis. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
6. Rizvi, S. S. Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration / S. S. Rizvi // Engineering properties of foods / eds.: M. A. Rao, S. S. H. Rizvi. Third Ed. Boca Raton et al.: Taylor & Francis, 2005. P. 239–326. <https://doi.org/10.1201/9781420028805.ch7>.
7. Research of Mulberry Fruit Drying in a Convection-Infrared Drying Equipment / A. Tarawade, D. Samandarov, J. Safarov, Sh. Sultanova // Proceedings of International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences, ICTACS 2022. P. 825–830. <https://doi.org/10.1109/ictacs56270.2022.9988323>.
8. Avci, A. The analysis of the Drying Process on Unsteady Forced Convection in Thin Films of Ink / A. Avci, M. Can // Applied Thermal Engineering. 1999. Vol. 19. P. 641–657. [https://doi.org/10.1016/s1359-4311\(98\)00079-9](https://doi.org/10.1016/s1359-4311(98)00079-9).
9. Baker, C. G. Industrial Drying of Foods / C. G. Baker. First Edition. New York: Blackie Academic and Professional, 1997. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1123-2>.
10. McMinn, W. A. Principles, Methods and Applications of the Convective Drying of Foodstuffs / W. A. McMinn, T. R. Magee. Food and Bioproducts Processing. 1999. Vol. 77, No 3. P. 175–193. <https://doi.org/10.1205/096030899532466>.
11. Madamba, P. S. The thin layer drying characteristics of garlic slices / P. S. Madamba, R. H. Driscoll, K. A. Buckle // Journal of Food Engineering. 1996. Vol. 29, No 1. P. 75–97. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3).
12. Karim, M. A. Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Tropical Fruits Drying / M. A. Karim, M. N. Hawlader // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48, No 23–24. P. 4914–4925. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.035>.
13. Desmorieux, H. Analysis of Dryer Performance for Tropical Foodstuffs Using the Characteristic Drying Curve Concept / H. Desmorieux, C. Moyne // Drying '92. Proceedings of the 8th International Drying Symposium (IDS '92), Montreal, Quebec, Canada, August 2–5 1992. P. 834–843.
14. Kumar, C. Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material / C. Kumar, G. J. Millar, M. A. Karim // Drying Technology. 2015. Vol. 33. P. 227–237. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.947512>.

15. El-Mesery, H. S. Comparison of a Gas Fired Hot-Air Dryer with an Electrically Heated Hot-Air Dryer in Terms of Drying Process, Energy Consumption and Quality of Dried Onion Slices / H. S. El-Mesery, G. Mwithiga // *African Journal of Agricultural Research*. 2012. Vol. 7, No 31. P. 4440–4452. <https://doi.org/10.5897/ajar12.614>.
16. Datta, A. K. Porous Media Approaches to Studying Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Processes. I: Problem Formulations / A. K. Datta // *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 80, No 1. P. 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>.
17. Thermal Properties of Gros Michel Banana Grown in Ghana / A. Bart-Plange, A. Addo, H. Ofori, V. Asare // *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7, No 4. P. 478–484.
18. Dandamrongrak R., Young G., Mason R. Evaluation of Various Pretreatments for the Dehydration of Banana and Selection of Suitable Drying Models // *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 55. P. 139–146. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(02)00028-6).
19. Есьман, Р. И. Математическая модель движущихся теплоносителей / Р. И. Есьман, Л. И. Шуб // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2010. № 6. С. 53–59.
20. Study of Cellulose Extraction and Cavitation From Plant Raw Materials / A. B. Usenov, D. I. Samandarov, D. K. Alimova // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1112. Art. 012148. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012148>.

Поступила 30.10.2024 Подписана в печать 08.01.2025 Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Voronova N. P. (2004) Solution of Problem Pertaining to Optimum Control over Heat- and Mass Transfer Process. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 76–78. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2004-0-5-76-78> (in Russian).
2. Tarawade A. R., Özçelik B., Sultanova Sh. A., Safarov J. E. (2021) Analysis of the Process of Mass Transfer During Drying. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 848, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012003>.
3. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79> (in Russian).
4. Heldman D. R., Hartel R. W. (1998) *Principles of Food Processing*. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4584-6>.
5. Geankoplis C. J. (1993) *Transport Processes and Unit Operations*. New Jersey: Prentice-Hall.
6. Rizvi S. S. (2005) Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. Rao M. A., Rizvi S. S., Datta A. K. (eds.). *Engineering Properties of Foods*. Third Ed. Boca Raton, Taylor & Francis, 239–326. <https://doi.org/10.1201/9781420028805.ch7>.
7. Tarawade A., Samandarov D., Safarov J., Sultanova Sh. (2022) Research of Mulberry Fruit Drying in a Convection-Infrared Drying Equipment. *Proceedings of International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences, ICTACS 2022*, 825–830. <https://doi.org/10.1109/ictacs56270.2022.9988323>.
8. Avci A., Can M. (1999) The Analysis of the Drying Process on Unsteady Forced Convection in Thin Films of Ink. *Applied Thermal Engineering*, 19, 641–657. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00079-9](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00079-9).
9. Baker C. G. (1997) *Industrial drying of foods*. First Edition. New York, Blackie Academic and Professional. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1123-2>.

10. McMinn W. A., Magee T. R. (1999) Principles, Methods and Applications of the Convective Drying of Food Stuffs. *Food and Bioproducts Processing*, 77 (3), 175–193. <https://doi.org/10.1205/096030899532466>.
11. Madamba P. S., Driscoll R. H., Buckle K. A. (1996) The Thin Layer drying Characteristics of Garlic Slices. *Journal of Food Engineering*, 29 (1), 75–97. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3).
12. Karim M. A., Hawlader M. N. A. (2005) Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Tropical Fruits Drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (23–24), 4914–4925.
13. Desmorieux H., Moyne C. (1992) Analysis of Dryer performance for Tropical Foodstuffs using the Characteristic Drying Curve Concept. *Drying '92. Proceedings of the 8th International Drying Symposium (IDS '92), Montreal, Quebec, Canada, August 2–5 1992*, 834–843.
14. Kumar C., Millar G. J., Karim M. A. (2015) Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material. *Drying Technology*, 33 (2), 227–237. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.947512>.
15. El-Mesery H. S., Mwithiga G. (2012) Comparison of a Gas Fired Hot-Air Dryer with an Electrically Heated Hot-Air Dryer in Terms of Drying Process, Energy Consumption and Quality of Dried Onion Slices. *African Journal of Agricultural Research*, 7 (31), 4440–4452. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.614>.
16. Datta A. K. (2007) Porous Media Approaches to Studying Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Processes. I: Problem Formulations. *Journal of Food Engineering*, 80 (1), 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>.
17. Bart-Plange A., Addo A., Ofori H., Asare V. (2012) Thermal Properties of Gros Michel Banana Grown in Ghana. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7 (4), 478–484.
18. Dandamrongrak R., Young G., Mason R. (2002) Evaluation of Various Pre-Treatments for the Dehydration of Banana and Selection of Suitable Drying Models. *Journal of Food Engineering*, 55 (2), 139–146. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00028-6).
19. Esman R. I., Shub L. I. (2010) Mathematical Model of Moving Heat Carriers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 53–59 (in Russian).
20. Usenov A. B., Samandarov D. I., Alimova D. K., Saparov Dj. E., Sultanov Sh. A. (2022) Study of Cellulose Extraction and Cavitation from Plant Raw Materials. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1112, 012148. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012148>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-76-96>

УДК 620.97

Принципы организации и функционирования мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях водородной энергетики

Р. С. Игнатович¹⁾

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

Реферат. В статье рассмотрены принципы организации и функционирования мини-ТЭЦ на местных видах топлива (МВТ) в условиях водородной и безуглеродной энергетики. В ходе анализа литературных источников на тему текущего состояния развития мини-ТЭЦ на МВТ в структуре энергетического баланса страны выявлен ряд вопросов, связанных с их эксплуатацией и строительством, образовавшихся после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС. Отмечено, что потенциальным путем развития подобных энергоисточников является переход к многоцелевой выработке продуктов на основании принципов функционирования энергетического хаба, что потенциально позволит снизить зависимость энергоисточника от работы Объединенной энергетической системы (ОЭС). Произведен анализ открытых литературных источников о потенциальной роли МВТ при переходе к безуглеродной энергетике. В данном контексте рассмотрена работа мини-ТЭЦ на МВТ по двум сценариям: рекуперация из продуктов сгорания CO_2 с последующей очисткой до пищевого качества и продажей непосредственным потребителям, а также изменение режимов работы энергоисточника посредством накопления избыточной электрической энергии в виде водорода при работе мини-ТЭЦ в соответствии с тепловой нагрузкой потребителей. На базе архивных данных действующей мини-ТЭЦ, выбранной для исследования в качестве объекта-аналога, произведена оценка экономических условий развития мини-ТЭЦ на МВТ при интеграции в их схемы установок по извлечению CO_2 пищевого качества или для производства и накопления водорода. Для систем производства диоксида углерода пищевого качества построена функциональная зависимость, позволяющая производить предварительную оценку величины простого срока окупаемости при ее интеграции в схему. В принятых условиях для объекта исследования простой срок окупаемости, полученный с использованием построенной зависимости, составил величину менее трех лет. Для систем накопления избыточной электрической энергии в виде водорода рассмотрены три варианта организации работы. На базе объекта исследования определены граничные условия соотношения минимального и максимального дифференцированного тарифа на покупку электрической энергии ОЭС, при которых целесообразно дальнейшее рассмотрение экономических показателей проекта по интеграции в схему мини-ТЭЦ на МВТ модуля накопления электрической энергии в виде водорода.

Ключевые слова: мини-ТЭЦ, местные виды топлива, диоксид углерода, водород, хранение энергии, тригенерация, полигенерация, энергоэффективность, энергетическая безопасность

Для цитирования: Игнатович, Р. С. Принципы организации и функционирования мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях водородной энергетики / Р. С. Игнатович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 76–96. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-76-96>

Адрес для переписки

Игнатович Роман Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65/2,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 308-26-25
pte@bntu.by

Address for correspondence

Ignatovich Roman S.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavistimosti Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 308-26-25
pte@bntu.by

Principles of Organization and Functioning of Mini-CHP Plants Using Local Fuels in Conditions of Hydrogen Energy

R. S. Ignatovich¹⁾

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

Abstract. This article discusses the principles of organization and operation of mini-CHP plants on local fuels (LF) to the conditions of hydrogen and carbon-free energy. The analysis of literary sources on the current state of development of mini-CHP plants on LF in the structure of the country's energy balance revealed a number of issues related to their operation and construction that arose after the commissioning of the Belarusian NPP. It is noted that a potential way to develop such energy sources is to switch to multi-purpose product development based on the principles of operation of the energy hub, which will potentially reduce the dependence of the energy source on the operation of the Unified Energy System (UES). The analysis of open literature sources on the potential role of LF in the transition to carbon-free energy was carried out. In this context, the operation of a mini-CHP plant on LF is considered according to two scenarios, viz. recovery of CO₂ from combustion products, followed by purification to food grade and sale to direct consumers, as well as changing the operating modes of the energy source by means of the accumulation of excess electrical energy in the form of hydrogen during the operation of a mini-CHP plant in accordance with the thermal load of consumers. Based on archival data from an operating wood chip-fueled mini-CHP with an ORC module that was selected for research as an analog object, an assessment of the economic conditions for the development of mini-CHP plants on LF was made when integrating food-grade CO₂ extraction units or for the production and accumulation of hydrogen into their schemes. For food grade carbon dioxide production systems, a functional dependency has been built that allows for a preliminary estimate of the value of the simple payback period when integrated into the scheme. Under the accepted conditions for the study object, the simple payback period obtained using the built dependency was less than 3 years. For systems of accumulation of excess electrical energy in the form of hydrogen, 3 options of the organization of work were considered. Based on the research object, the presence of boundary conditions for the ratio of the minimum and maximum differentiated tariff for the purchase of electric energy of the UES has been determined, under which it is advisable to further consider the economic indicators of the project for integrating a module for accumulating electric energy in the form of hydrogen into the scheme of a mini-CHP plant on LP.

Keywords: mini-CHP, local fuels, carbon dioxide, hydrogen, energy accumulation, trigeneration, polygeneration, energy efficiency, energy security

For citation: Ignatovich R. S. (2025) Principles of Organization and Functioning of Mini-CHP Plants Using Local Fuels in Conditions of Hydrogen Energy. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (1), 76–96. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-68-1-76-96> (in Russian)

Введение

В рамках обеспечения энергетической безопасности и проведения политики декарбонизации экономики в Республике Беларусь предполагается максимальное использование собственных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [1–4]. Ключевыми преимуществами использования местных видов топлива (МВТ) является сокращение потребления импортируемого природного газа и соответственно валютных затрат на его приобретение, а также создание в стране соответствующей индустрии и новых рабочих мест [5, 6]. Кроме того, использование традиционных для Республики Беларусь МВТ, к которым в первую очередь относятся древесина и торф [2],

способствует снижению выбросов CO_2 в структуре энергетического баланса, так как согласно современной концепции «углеродной нейтральности» сжигание биомассы не ведет к увеличению выбросов парниковых газов в атмосферу [7], что особенно актуально в связи с обязательствами, взятыми на себя нашей страной в рамках присоединения к Парижскому климатическому соглашению [8, 9]. При этом открытым остается вопрос выбора вида теплоисточника в системах централизованного теплоснабжения при использовании МВТ. Ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС и относительно высокая удельная стоимость электрогенерирующих мощностей на МВТ [10, 11] склоняют чашу весов к применению в качестве теплоисточников котельных. Однако мировой опыт развития и применения теплофикации, как наиболее энергоэффективного решения в области теплоснабжения [12], требует более тщательного исследования данной проблемы.

Следовательно, актуальным остается вопрос поиска путей повышения экономической привлекательности при строительстве и эксплуатации мини-ТЭЦ, работающих на МВТ, а также разработка научно-методических материалов и рекомендаций, на основании которых в дальнейшем может быть осуществлен макроэкономический анализ целесообразности увеличения доли подобных энергоисточников в структуре энергетического баланса Республики Беларусь. Среди вариантов повышения экономической привлекательности мини-ТЭЦ на МВТ выделены изменение режимов работы генерирующего оборудования с накоплением избыточной тепловой либо электрической энергии [13, 14], развитие полигенерационной выработки на базе мини-ТЭЦ с опцией дополнительного производства холода, диоксида углерода [15, 16], водорода [17], синтетического природного газа [18, 19].

Принципы организации мини-ТЭЦ на МВТ

Целью настоящей работы являлось развитие принципов организации и функционирования комбинированных энергоисточников, работающих на МВТ, в условиях водородной и безуглеродной энергетики. Ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС установленной электрической мощностью 2,4 ГВт оказывает существенное влияние на преобразование энергетической системы Республики Беларусь. Ожидается, что благодаря АЭС доля природного газа в структуре энергетического баланса страны снизится до 60 % [20]. А так как данный вид энергоисточников считается низкоуглеродным [21], подобная диверсификация топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) является существенным шагом на пути к декарбонизации энергетической системы и повышению энергетической безопасности страны. В работах [5, 6] отмечено, что одним из возможных шагов в данном направлении может быть увеличение доли МВТ в структуре ТЭР. Кроме того, в данных работах также сформулированы факторы привлекательности строительства комбинированных энергоисточников малой мощности (мини-ТЭЦ) на МВТ. Вместе с этим очевидно, что важную роль при определении путей дальнейшего развития энергетической системы играют экономические показатели систем энергоснабжения на МВТ.

Использование мини-ТЭЦ на МВТ для обеспечения теплоснабжения малых городов, промышленных предприятий либо иных потребителей тепловой энергии соответствует принципу децентрализации энергетической системы [22], что в свою очередь приводит к повышению надежности энергоснабжения потребителей, так как энергия вырабатывается вблизи места ее потребления.

В настоящей работе рассмотрен перевод мини-ТЭЦ на МВТ на полигенерационную (многоцелевую) выработку энергии для обеспечения интеграции энергоисточника с другими отраслями экономики. При этом рассмотрены два различных подхода к модернизации схемы мини-ТЭЦ, а именно: интеграция в схему энергоисточника модулей производства дополнительных высокомаржинальных продуктов (диоксид углерода [15, 16], водород [17]), а также изменение режимов работы энергоисточника посредством накопления избыточной электрической энергии в виде водорода в часы падения ее потребления [13] для последующего преобразования в электрическую энергию и продажи в часы пикового потребления. В первом случае экономический эффект мини-ТЭЦ на МВТ связан с реализацией дополнительных продуктов сторонним потребителям, а во втором случае экономический эффект достигается посредством распределения мощности, продаваемой в Объединенную энергетическую систему (ОЭС) либо потребителям, исходя из установившихся тарифов. При этом в обоих вариантах возможно сохранение иерархической структуры технологической системы [23], что позволяет, например, снизить риски ошибок при обеспечении потребителей первой категории. Вариант с накоплением электрической энергии для балансировки неравномерности суточного графика потребления энергии вызывает интерес в контексте понижения зависимости энергоисточника от энергетической системы.

Следует отметить, что предложенная концепция работы мини-ТЭЦ на МВТ с опцией производства, помимо тепловой и электрической энергии, диоксида углерода, а также «зеленых» энергоносителей (таких, как водород) соответствует принципам работы энергетического хаба [20, 21], так как предполагает интегрированное (комбинированное) производство различных видов энергии, оптимизацию распределения энергии, а также накопление энергии, что способствует повышению устойчивости работы системы в целом. В результате критерием эффективности мини-ТЭЦ, входящей в состав энергетического хаба, становится не выработка электрической энергии на тепловом потреблении, а экономический эффект, получаемый при работе всего энергоцентра.

В связи с тем, что при сжигании МВТ выбросы диоксида углерода принято считать равными нулю, интерес вызывает определение величины снижения выбросов CO_2 при переходе от сжигания ископаемого топлива на сжигание биомассы. Методология для подобных расчетов приведена в документе Clean Development Mechanism (CMD), разработанном под эгидой ООН [24]. Наиболее общим среди приведенных в указанной методике уравнением для определения величины выбросов диоксида углерода является

$$COEF_i = NCV_i \cdot EF_{CO_2i}, \quad (1)$$

где $COEF_i$ – величина выбросов CO_2 при сжигании ископаемого топлива i -го типа, кг CO_2 ; NCV_i – количество энергии, выделяемое при сжигании ископаемого топлива i -го типа, ГДж; EF_{CO_2i} – коэффициент, характеризующий удельные выбросы диоксида углерода, образующиеся при сжигании ископаемого топлива i -го типа, кг CO_2 /ГДж.

С использованием (1) можно оценить удельную величину снижения выбросов CO_2 при генерации 1 кВт·ч (0,0036 ГДж) электрической энергии в случае замены природного газа на МВТ следующим образом. Выбросы CO_2 при сжигании МВТ принимаются равными нулю, а при сжигании природного газа коэффициент, характеризующий удельные выбросы CO_2 , равным 56,1 кг CO_2 /ГДж. Тогда для 1 кВт·ч электрической энергии (при электрическом КПД энергоисточника 40 %) при переходе на МВТ снижение выбросов CO_2 составит 0,50 кг CO_2 /(кВт·ч).

При этом следует отметить, что ряд европейских исследователей, например [25, 26], ставят под сомнение текущий подход к определению величины выбросов парниковых газов, образующихся при сжигании биомассы. В [25] отмечается, что современный подход к концепции «углеродной нейтральности» не учитывает возможность долгосрочного хранения древесины либо ее полезного использования. Авторы статьи приходят к выводу, что увеличение потребления продуктов из древесины, а также использование ископаемого топлива с низким количеством выбросов парниковых газов, например природного газа, в период энергетического перехода к безуглеродным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) (гидроэнергетика, солнечная и ветровая энергетика, атомная энергетика) является предпочтительным для количественного снижения выбросов парниковых газов в атмосферу. В этом контексте следует отметить, что одним из недостатков МВТ является повышенное, в сравнении с чистыми углеводородами, удельное содержание CO_2 на единицу установленной мощности в продуктах сгорания биомассы [27, 24]. В отчете [26] говорится о том, что согласно документу European Green Deal 2020 г. в существующие энергетические директивы вносятся некоторые поправки, среди которых отказ Европейского союза от поддержки использования биомассы (особенно древесины) в энергетическом секторе.

Таким образом, из всего вышесказанного следует, что с течением времени мини-ТЭЦ на МВТ могут перестать считаться безуглеродными источниками энергии. В этой связи дальнейшим шагом развития энергоисточников, работающих МВТ, в направлении углеродной нейтральности может стать внедрение мероприятий по извлечению углекислоты из продуктов сгорания с целью последующего использования в промышленных целях, в технологических процессах или, например, в технологиях производства синтетического природного газа [18, 19]. Интеграция в схемы мини-ТЭЦ на МВТ технологии улавливания, полезного использования и хранения CO_2 (Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)) гарантированно позволит считать данные энергоисточники объектами с отрицательными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу. Кроме того, технология

CCUS выделяется Международным энергетическим агентством [28] как основная для достижения целей углеродной нейтральности, так как она способствует сокращению выбросов парниковых газов в ключевых секторах промышленности и энергетики.

**Оценка экономических условий развития мини-ТЭЦ
на МВТ путем интеграции в их схему установок
по извлечению CO_2 пищевого качества из продуктов сгорания**

На сегодняшний день в Республике Беларусь отсутствуют экономические стимулы для снижения выбросов диоксида углерода в окружающую среду, а также для реализации дорогостоящих мероприятий, связанных с CCUS. В этой связи экономическая целесообразность при интеграции в схему мини-ТЭЦ модуля извлечения диоксида углерода возможна только в случае реализации извлекаемого продукта непосредственным потребителям. В работе [15] приведен сравнительный анализ технологий извлечения CO_2 из продуктов сгорания мини-ТЭЦ на МВТ. Согласно результатам, приведенным в данной работе, ни одна из технологий извлечения диоксида углерода не позволяет получать на 100 % очищенный CO_2 . Так, физический и адсорбционный методы извлечения способны обеспечить степень чистоты диоксида углерода 68 и 77 % соответственно, что является основным сдерживающим фактором для применения данных технологий. Потенциальными потребителями углекислоты такого качества могут быть нефтедобывающие компании, способные организовывать закачку углекислоты в истощенные месторождения, что позволит увеличить их выработку [29], но в условиях нашей страны это направление использования извлекаемого из дымовых газов диоксида углерода малоперспективно. Альтернативной сферой применения CO_2 такого качества могут стать парниковые хозяйства, где углекислый газ может быть использован для повышения урожайности во время светового дня [30]. Однако данный метод применения может потребовать организацию систем хранения углекислого газа в ночные часы. Кроме того, в производственных технологиях парниковых хозяйств применяются более простые способы подкормки растений углекислотой.

Нашедший наибольшее распространение в промышленности метод химической абсорбции без дополнительных мероприятий по очистке позволяет получать CO_2 чистотой порядка 85 % [15], в то время как согласно ГОСТ 8050–85 [31] для применения CO_2 в пищевой промышленности его доля в газовой смеси должна составлять от 98,8 % (2-й сорт) до 99,8 % (высший сорт). Таким образом, для достижения пищевого качества диоксида углерода требуется выполнять дополнительную очистку извлекаемого CO_2 в специальном технологическом модуле, технологическая схема которого приведена в работах [32, 33]. Наиболее перспективными в условиях Республики Беларусь потребителями диоксида углерода пищевого качества могут выступать предприятия пищевой промышленности, объем производства которых, согласно [34, 35], в последние годы непрерывно растет.

В рамках данного исследования рассмотрен вопрос экономической целесообразности интеграции в схему мини-ТЭЦ на МВТ модулей извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания с последующей очисткой до пищевого качества. В качестве критерия для оценки выбран простой срок окупаемости, выраженный в виде зависимостей, связывающих экономические факторы (тарифы на электрическую энергию, топливо, абсорбент и рыночную стоимость CO_2), с одной стороны, и технические характеристики подобных установок, с другой [36].

На основании информации, полученной от заводов – изготовителей установок извлечения CO_2 пищевого качества, определена функциональная зависимость, определяющая капитальные затраты:

$$K_{\text{кап}} = 57,72 \cdot 10^3 e^{(7,39 \cdot 10^{-4} \cdot G_{\text{CO}_2})}, \quad (2)$$

где G_{CO_2} – производительность установки по очищенному CO_2 , кг/ч.

Функциональная зависимость, позволяющая производить предварительную оценку простого срока окупаемости установки по производству CO_2 пищевого качества [15]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{кап}} \cdot 1,27 + K_{\text{дост}}}{G_{\text{CO}_2} n \delta \left(S_{\text{CO}_2} - \left(0,2 S_{\text{э}} + 0,0006 S_{\text{МЭА}} + \frac{2,5 r S_{\text{т-ва}}}{\eta_{\text{ка}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \right) \delta_{\text{экспл}} \right)}, \quad (3)$$

где $T_{\text{ок}}$ – простой срок установки модуля, лет; G_{CO_2} – производительность установки по очищенному CO_2 , кг/ч; n – число часов работы установки в год, ч/год; δ – коэффициент загрузки оборудования от номинальной производительности; S_{CO_2} – стоимость CO_2 , дол./кг; $S_{\text{э}}$ – то же электрической энергии, дол./(кВт·ч); $S_{\text{МЭА}}$ – то же раствора МЭА, дол./кг; $S_{\text{т-ва}}$ – то же топлива, дол./м³ (для газообразного топлива), дол./кг (для твердого топлива); r – скрытая теплота парообразования при рабочем давлении, кДж/кг; $\eta_{\text{ка}}$ – КПД генерирующего пар оборудования, %; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/м³ (для газообразного топлива), кДж/кг (для твердого топлива); $K_{\text{кап}}$ – капитальные затраты на основное и вспомогательное оборудование, дол.; $K_{\text{дост}}$ – затраты на доставку оборудования до производственной площадки, дол.; $\delta_{\text{экспл}}$ – коэффициент затрат на эксплуатационные расходы; 1,27 – коэффициент на строительно-монтажные, проектно-изыскательные и пуско-наладочные работы в соответствии с [37]; 0,2 – удельное потребление электрической энергии на 1 кг CO_2 ; кВт·ч/кг CO_2 ; 0,0006 – удельные потери МЭА на 1 кг CO_2 ; кг МЭА/кг CO_2 ; 2,5 – удельное потребление насыщенного пара на нужды установки на 1 кг CO_2 ; кг пара/кг CO_2 .

Для оценки экономической целесообразности мероприятий по интеграции в схему энергоисточника модуля производства CO_2 пищевого качества в качестве объекта исследования рассмотрена функционирующая в г. Минске мини-ТЭЦ УП «Минсккоммунтеплосеть» по ул. Павловского, в состав которой входит энергоблок с двумя котлами на МВТ тепловой мощностью по 4 МВт

и ORC-установкой электрической мощностью 1,2 МВт [15–16]. В табл. 1 приведены исходные данные, принятые при выполнении численного исследования. На рис. 1 представлены зависимости для величины простого срока окупаемости от производительности установки и стоимости CO_2 .

Таблица 1

Исходные значения независимых параметров, принятые при оценке срока окупаемости установки по извлечению CO_2 из продуктов сгорания мини-ТЭЦ на MBT

The initial values of the independent parameters used in estimating the payback period of a plant for extracting CO_2 from combustion products of a mini-CHP plant on LF

Наименование	Обозначение	Величина
Число часов работы установки в год, ч/год	n	7500
Коэффициент загрузки оборудования, %	δ	80
Стоимость электрической энергии, дол./кВт·ч	$S_{эз}$	0,15
Стоимость раствора МЭА, дол./кг	$S_{\text{МЭА}}$	6
Стоимость топлива, дол./кг	$S_{\text{т-ва}}$	0,05
Давление насыщенного пара, бар (изб.)	p	3,5
Скрытая теплота парообразования пара, кДж/кг	r	2120
КПД теплогенерирующего оборудования, %	$\eta_{\text{ка}}$	85
Низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/кг	$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$	10100
Стоимость доставки оборудования, дол.	$K_{\text{дост}}$	100 000
Коэффициент затрат на эксплуатационные расходы	$\delta_{\text{экспл}}$	1,5

Как следует из рис. 1, величина простого срока окупаемости при интеграции модуля производства CO_2 пищевого качества производительностью 300 кг/ч в схему мини-ТЭЦ на MBT при стоимости диоксида углерода 0,5 дол./кг составит менее трех лет. Следовательно, при принятых исходных данных интеграция модуля производства углекислоты пищевого качества в состав энергоисточника целесообразна.

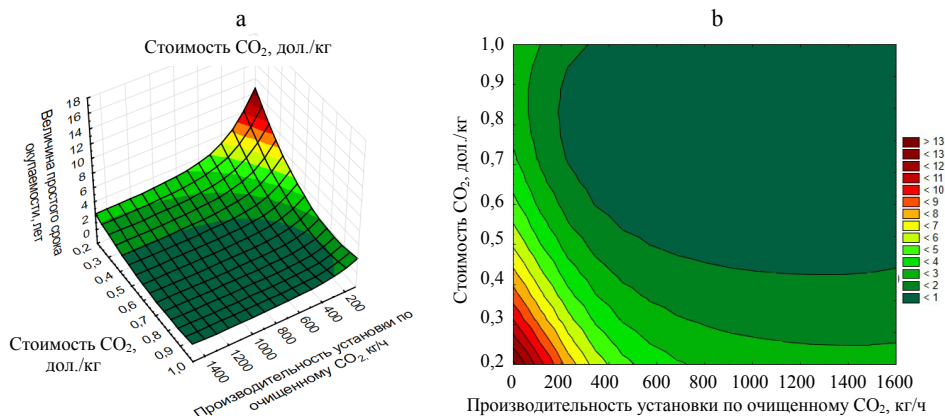


Рис. 1. Характер изменения простого срока окупаемости от производительности установки по очищенному CO_2 и стоимости CO_2 : а – в виде поверхности; б – в виде проекции

Fig. 1. The nature of the change in the simple payback period from the plant's performance in terms of purified CO_2 and the cost of CO_2 : а – in the form of a surface; б – in the form of a projection

Определение экономических условий развития мини-ТЭЦ на МВТ путем интеграции в их схему установок по производству водорода

Рассмотрим экономическую целесообразность повышения маневренности мини-ТЭЦ на МВТ путем интеграции в ее схему установки для аккумуляирования избыточной электрической энергии в виде водорода посредством электролиза воды [13]. Производство и накопление водорода предполагается осуществлять в часы суточного падения потребления электрической энергии в ОЭС, энергетической – при работе мини-ТЭЦ в соответствии с тепловым графиком потребления энергии. Полученный водород может быть продан конечным потребителям в чистом виде либо преобразован в электрическую энергию в часы ее максимального потребления в ОЭС. В последнем случае экономический эффект может быть достигнут за счет применения дифференцированного по времени суток тарифа, реализованного в Республике Беларусь. Значения тарифов динамичны и ежегодно корректируются. По состоянию на 2024 г., тарифы на электрическую энергию по трем временным интервалам для юридических лиц составляют [38]:

- 0,38794 руб./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$) – с 6:00 до 15:00;
- 0,35421 руб./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$) – с 15:00 до 23:00;
- 0,2024 руб./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$) – с 23:00 до 6:00.

Таким образом, по состоянию на 2024 г., соотношение максимального суточного тарифа к минимальному составляло величину, равную 1,9.

Выполним анализ экономической целесообразности интеграции модуля накопления водорода посредством электролиза в схему мини-ТЭЦ на МВТ с использованием архивных данных по режимам работы вышеупомянутой мини-ТЭЦ УП «Минсккоммунтеплосеть» по ул. Павловского. При этом определение загрузки мини-ТЭЦ и соответствующего количества отпущенной потребителям тепловой энергии осуществлялось в соответствии с функциональной моделью, приведенной в работе [13] и отнесенной к объекту исследования. Рассмотрены три возможных варианта работы блока накопления электрической энергии посредством водорода:

сценарий 1 – накопление водорода, полученного в часы минимальных тарифов на электрическую энергию в ОЭС (с 23:00 до 6:00), с последующей продажей в чистом виде непосредственным потребителям водорода;

сценарий 2 – накопление водорода, полученного от ОРС-установки в часы минимальных тарифов на электрическую энергию в ОЭС (с 23:00 до 6:00) без реверса из ОЭС, с последующим преобразованием водорода посредством топливного элемента в электрическую энергию в часы максимальных тарифов на электрическую энергию в ОЭС (с 6:00 до 15:00);

сценарий 3 – накопление водорода, полученного от ОРС-установки в часы минимальных тарифов на электрическую энергию в ОЭС (с 23:00 до 6:00) с дополнительным реверсом из ОЭС, с последующим преобразованием водорода посредством топливного элемента в электрическую энергию в часы максимальных тарифов на электрическую энергию в ОЭС (с 6:00 до 15:00).

Экономический эффект от интеграции в схему мини-ТЭЦ модуля генерации водорода заключается в том, что комбинированный энергоисточник, вместо того чтобы продавать электрическую энергию в ОЭС по минимальному тарифу, тем самым усложняя работу ОЭС в часы провала потре-

ния энергии в отопительный период, накапливает избыточную электрическую энергию до тех пор, пока тарифы не вырастут до максимальных. В данном случае рост тарифов соответствует максимальному спросу на электрическую энергию и поэтому дополнительный отпуск электроэнергии в сеть облегчает прохождение пиковых нагрузок ОЭС. Сценарий 3 также предполагает дополнительную закупку электрической энергии из сети по минимальным тарифам для преобразования ее в водород и последующей продажи в ОЭС по максимальному тарифу.

В качестве базового рассмотрен вариант работы мини-ТЭЦ на МВТ с отпуском тепловой и электрической энергии во внешние сети. Экономический эффект для обозначенных сценариев рассчитывается при работе мини-ТЭЦ с нагрузкой, соответствующей графикам потребления тепловой энергии, т. е. в режиме работы по тепловому потреблению. При данной постановке задачи абсолютные значения величины получаемого денежного потока не имели решающего значения, поэтому предметом расчета являлась оценка целесообразности работы по вышеуказанным сценариям. Для всех сценариев график отпуска тепловой энергии потребителям для каждого временного интервала зафиксирован одинаковым. Данные обстоятельства позволяют также не учитывать величину денежного потока от реализации тепловой энергии потребителям при сопоставлении экономической эффективности предложенных сценариев. Как предлагалось в [13], емкость электролизеров была подобрана в соответствии с установленной электрической мощностью мини-ТЭЦ.

Для визуализации описанных выше сценариев работы мини-ТЭЦ на МВТ с опцией накопления электрической энергии в виде водорода в табл. 2 приведена циклограмма, отражающая время протекания процессов отпуска электрической энергии (ЭЭ), сгенерированной на мини-ТЭЦ, генерации и накопления H_2 , преобразования H_2 в электрическую энергию, а также дополнительной покупки электрической энергии из ОЭС.

В случае сценария 1 электрическая энергия, генерируемая на мини-ТЭЦ, используется для генерации водорода. Полученный водород сжимается посредством компрессоров и направляется непосредственным потребителям. Согласно [39], наиболее подходящим оборудованием для получения водорода в обозначенных условиях является щелочной электролиз. Удельные затраты электрической энергии на 1 кг H_2 составляют от 47 до 66 кВт·ч/кг. При расчетах экономической эффективности использовано среднее значение из данного диапазона (56,5 кВт·ч/кг). Кроме того, при расчете потребления электрической энергии учитывались затраты на сжатие водорода. Как отмечалось в [13], величина удельных затрат на сжатие H_2 до давления, при котором обычно осуществляются транспортировка и хранение водорода, составляет до 6 кВт·ч/кг.

В случае сценария 2 предполагается, что потребители чистого водорода отсутствуют и электрическая энергия, генерируемая на мини-ТЭЦ в часы минимальных тарифов на электрическую энергию в ОЭС (с 23:00 до 6:00), преобразуется в водород и накапливается. Затем в период максимальных тарифов на электрическую энергию в ОЭС (с 6:00 до 15:00) накопленный водород используется в топливных элементах. При проведении расчетов в качестве технической характеристики топливных эле-

ментов принят электрический КПД, приведенный к низшей рабочей теплоте сгорания водорода. Формула для определения электрического КПД приведена в работе [40].

Таблица 2

Циклограмма работы мини-ТЭЦ на МВТ с модулем накопления электрической энергии в виде H_2 для предложенных сценариев

A cyclogram of the operation of a mini-CHP plant on LF with an electric energy accumulating module in the form of H_2 for the proposed scenarios

[illegible]

В топливном элементе предлагается использовать чистый водород, полученный в результате электролиза, без использования его для комбинированной выработки энергии (в целях минимизации капитальных затрат, а также получения максимальной величины электрического КПД). По этой причине рекомендуется использование щелочного топливного элемента. На основании данных из [41, 42] величина электрического КПД щелочного топливного элемента (AFC) принята равной 60 %.

Сценарий 3 аналогичен сценарию 2, за исключением того, что предполагает реверс электрической энергии из ОЭС. Как говорилось ранее, установленная мощность электролизера для всех сценариев подбирается в соответствии с установленной электрической мощностью мини-ТЭЦ. При этом согласно сценарию 2 загрузка электролизера в период минимальных тарифов на электрическую энергию должна быть пропорциональна текущей загрузке мини-ТЭЦ. В случае сценария 3 электролизер в обозначенный период загружен на номинальную мощность. Обеспечивается это за счет закупки из ОЭС дополнительной электрической энергии.

В качестве исходных данных при выполнении расчета величины денежного потока, получаемой при работе объекта исследования в соответствии с представленными сценариями, приняты архивные данные по температуре наружного воздуха в г. Минске по интервалам времени за 2023 г. [43], информация о начале и окончании отопительного периода в 2023 г. [44, 45].

На рис. 2 приведена зависимость величины денежного потока, получаемого при реализации электрической энергии на объекте исследования (по архивным данным 2023 г.), от тарифа на ее покупку в ночные часы для сценариев 2, 3 на фоне базового сценария.

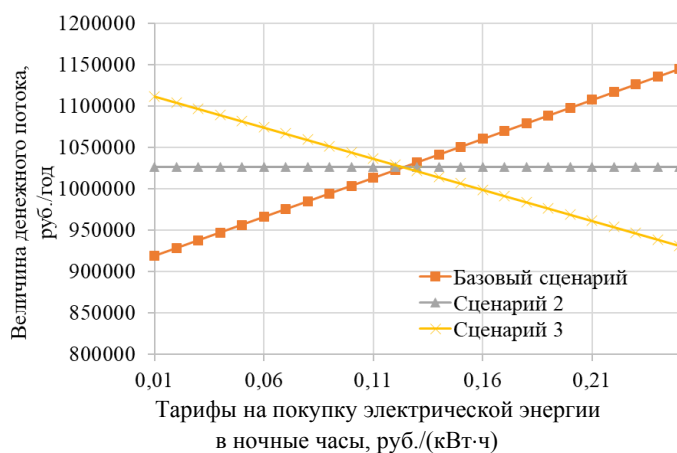


Рис. 2. Зависимость величины денежного потока при реализации электрической энергии на объекте исследования (по архивным данным 2023 г.) от тарифа на ее покупку в ночные часы

Fig. 2. Dependency of the amount of cash flow during the sale of electric energy at the research object (according to archival data in 2023) on the tariff for its purchase at night

На рис. 3 приведена зависимость величины денежного потока при реализации электрической энергии и водорода потребителям (согласно сценарию 1) от тарифа на покупку H_2 сторонними потребителями.

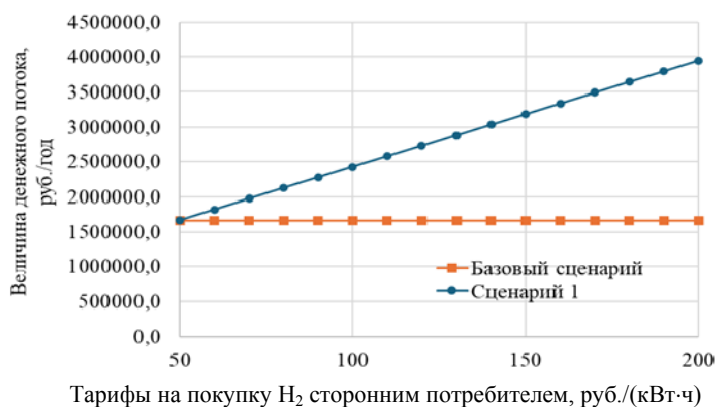


Рис. 3. Зависимость величины денежного потока при реализации электрической энергии и водорода потребителям (согласно сценарию 1) от тарифа на покупку H_2 сторонними потребителями

Fig. 3. Dependency of the amount of cash flow during the sale of electric energy and hydrogen to consumers (according to scenario 1) on the tariff for the purchase of H_2 by third-party consumers

На рис. 4 приведена зависимость величины денежного потока при реализации электрической энергии на объекте исследования (по архивным данным 2023 г.) от тарифа на ее покупку в часы пикового потребления.

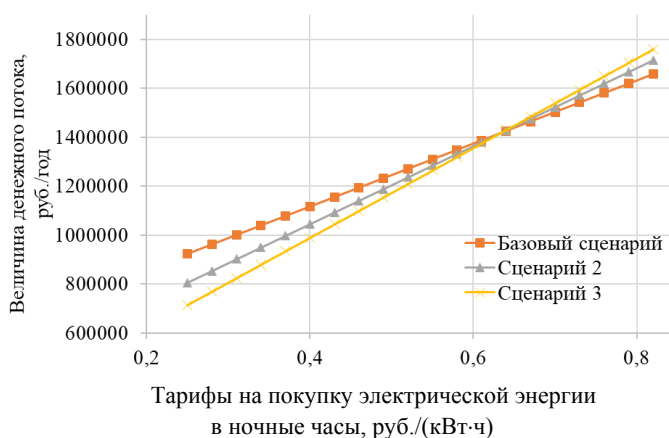


Рис. 4. Зависимость величины денежного потока при реализации электрической энергии на объекте исследования (по архивным данным 2023 г.) от тарифа на ее покупку в часы пикового потребления

Fig. 4. Dependency of the amount of cash flow during the sale of electric energy at the research object (according to archival data in 2023) on the tariff for its purchase during peak consumption hours

При анализе графиков на рис. 2 и 4 можно выделить граничные условия абсолютных величин, при которых мероприятия по накоплению энергии становятся экономически целесообразными. При этом соотношение максимального тарифа к минимальному в точке пересечения величины денежного потока для сценариев 2, 3 с базовым вариантом для обоих графиков составляет величину, равную 3,1. После проведения первичной оценки должно быть выполнено более полное технико-экономическое обоснование, включающее в себя определение капитальных затрат на необходимое оборудование (электролизеры, система сжатия, система подготовки воды, система адсорбционной осушки, система хранения, система разрядки и другое), с применением стандартных показателей экономической эффективности (простой и динамический срок окупаемости, ЧДД и т. д.).

ВЫВОДЫ

1. Выявлен ряд вопросов, связанных с эксплуатацией мини-ТЭЦ на MBT и их строительством, после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС. Определено, что потенциальным путем их развития является переход к многоцелевой выработке продуктов на основании принципов функционирования энергетического хаба, что позволит снижать зависимость энергисточника от работы Объединенной энергетической системы.

2. Предложена концепция строительства (реконструкции) мини-ТЭЦ на MBT по полигенерационной (многоцелевой) схеме с генерацией электрической и тепловой энергии и получением дополнительных материальных потоков диоксида углерода пищевого качества и водорода.

3. На базе архивных данных мини-ТЭЦ УП «Минсккоммунтеплосеть» по ул. Павловского, выбранной для исследования в качестве объекта-аналога, произведена оценка экономических условий развития мини-ТЭЦ на MBT при интеграции в ее схему установок по извлечению CO_2 пищевого качества, а также установок для производства и накопления водорода. Для систем производства диоксида углерода пищевого качества построена функциональная зависимость, позволяющая производить предварительную оценку величины простого срока окупаемости при ее интеграции в схему. В принятых условиях для объекта исследования величина простого срока окупаемости, полученная с использованием построенной зависимости, составила величину менее трех лет. Для систем накопления избыточной электрической энергии в виде водорода рассмотрены три варианта организации работы, определены граничные условия соотношения минимального и максимального дифференцированных тарифов на покупку электрической энергии ОЭС, при которых целесообразно дальнейшее рассмотрение экономических показателей проекта по интеграции в схему мини-ТЭЦ на MBT модуля накопления электрической энергии в виде водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении концепции энергетической безопасности Республики Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 23 дек. 2015 г. № 1084 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084>.
2. О государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 24 фев. 2021 г. № 103 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103>.
3. Программа комплексной модернизации производств энергетической сферы на 2021–2025 годы: постановление М-ва энергетики Респ. Беларусь от 5 апр. 2021 г. № 19. URL: <https://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/2021/%D0%9F%D0%9A%D0%9C%D0%AD%202025-%D1%81.pdf>.
4. Богдан, А. А. Синергетическая парадигма и инновационные решения в сфере энергетической безопасности / А. А. Богдан, Р. С. Игнатович // Информационные и инновационные технологии в науке и образовании: 5-я Всерос. науч.-практ. конф. Таганрог, 2020. С. 26–30.
5. Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 1: Состояние использования местных видов топлива в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // Наука и техника. 2023. № 5. С. 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427>.
6. Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 2: Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // Наука и техника. 2023. № 6. С. 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>.
7. Оценка эмиссии парниковых газов при использовании ископаемых топлив и биомассы / М. В. Губинский, А. Ю. Усенко, Г. Л. Шевченко, Ю. В. Шишко // Интегрированные технологии и энергосбережение. 2007. № 2. С. 39–42.
8. Парижское климатическое соглашение // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. URL: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/> (дата обращения: 10.06.2023).
9. Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 г.: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 29 сент. 2021 г. № 553 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100553>.
10. Biomass for Power Generation and CHP / IEA. 2007. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1028bee0-2da1-4d68-8b0a-9e5e03e93690/essentials3.pdf>. (date of access: 18.07.2023).
11. Techno-Economic Assessment of an Off-Grid Biomass Gasification CHP Plant for an Olive Oil Mill in the Region of Marrakech-Safi, Morocco / D. Sánchez-Lozano, A. Escámez, R. Aguado [et al.] // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No 10. P. 5965. <https://doi.org/10.3390/app13105965>.
12. Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Ч. 2 / В. Н. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 2. С. 141–157. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-141-157>.
13. Игнатович, Р. С. Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Ч. 2 / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин, Е. С. Зуева // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. № 4. С. 315–331. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-315-331>.

14. Игнатович, Р. С. Прогнозирование потребления тепловой энергии для увеличения вовлеченности мини-ТЭЦ в структуру выработки энергии / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин // *Mugobil energetika = Альтернативная энергетика*. 2024. № 12 (Спец. вып.). С. 102–106. URL: https://drive.google.com/file/d/1QuREX-WJupvSv2kCM51ZBsNQQG_zKPtO/view.
15. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.
16. Игнатович, Р. С. Технологии извлечения CO₂ из продуктов сгорания = CO₂ Recovery Technologies From Combustion Products / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин // *Энергетика Беларуси-2022: материалы Респ. науч.-практ. конф., 25–26 мая 2022 г. / сост. И. Н. Прокопеня*. Минск: БНТУ, 2022. С. 43–48. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/121697/43-48.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
17. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. № 4. С. 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
18. Игнатович, Р. С. Технология производства синтетического природного газа на теплоисточниках, работающих на твердом топливе / Р. С. Игнатович // *Энергостарт: материалы Всерос. молодеж. науч.-практ. конф., 12–14 нояб. 2020 г. / редкол.: Р. В. Беляевский (отв. редактор) [и др.]*. Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2021. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energostart/2020/energostart/pages/Articles/110.pdf>.
19. Игнатович, Р. С. Минитеплоэлектроцентраль на местных видах топлива с опцией производства синтетического природного газа / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин // *Актуальные проблемы энергетики: материалы 76-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов* / ред. Т. Е. Жуковская. Минск: БНТУ, 2020. С. 104–107.
20. Виктор Каранкевич: «С вводом АЭС доля природного газа в энергобалансе Беларуси снизится до 60 %» // Министерство энергетики Республики Беларусь. URL: https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-s-vvodom-aes-dolya-prirodnogo-gaza-v-energobalanse-belarusi-snizitsya-do-60-/?sphrase_id=52175 (дата обращения: 01.06.2023).
21. Nuclear Power and Climate Change: Decarbonization // IAEA. URL: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-and-climate-change> (date of access: 01.11.2024).
22. Power system organization structures for the renewable energy era / International Renewable Energy Agency. IRENA, 2020. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jan/IRENA_Power_system_structures_2020.pdf. (date of access: 01.11.2024).
23. Куприянов, М. С. Принципы построения технических самоорганизующихся систем / Куприянов М. С., А. В. Кочетков // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2014. № 8. С. 28–32.
24. Methodological Tool “Tool to Calculate Project or Leakage CO₂ Emissions From Fossil Fuel Combustion”. Version 02. URL: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-03-v2.pdf>.
25. Leturcq, P. Wood Preservation (Carbon Sequestration) Or Wood Burning (Fossil-Fuel Substitution), Which is Better for Mitigating Climate Change? / P. Leturcq // *Annals of Forest Science*. 2014. Vol. 71. С. 117–124. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0269-9>.
26. European Green Deal Policy Guide / KPMG. KPMG International, 2022. URL: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2022/01/green-deal-policy-guide-web-2022.pdf>. (date of access: 09.06.2024).
27. Экология промышленных технологий: учеб.-метод. комплекс / сост.: О. Ф. Краецкая, И. Н. Прокопеня. Минск: БНТУ, 2014. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/10557>.
28. Energy Technology Perspectives 2020 / International Energy Agency. IEA. 2020. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf.

29. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокиси углерода (CCUS) / А. А. Осипцев, И. В. Гайда, Е. В. Грушевенко, С. Капитонов. Scoltech, 2022. URL: https://esg-library.mgimo.ru/publications/tekhnologii-ulavlivaniya-poleznogo-ispolzovaniya-i-khraneniya-dvuokisi-ugleroda-ccus/?utm_source=yandex.by&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.by&utm_referrer=yandex.by.
30. CO₂ Enrichment in Greenhouse Production: Towards a Sustainable Approach / A. Wang, J. Lv, J. Wang, K. Shi // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 1029901. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1029901>.
31. Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия: ГОСТ 8050–85. Взамен ГОСТ 8050–76; введ. 01.01.1987. М.: Стандартиформ, 2006. 24 с.
32. The Opportunities for Reducing GHG Emissions Through the Capture of Carbon Dioxide During the Production of Bioethanol: ‘Pumping Carbon from the Atmosphere’. London: Imperial College Centre for Energy Policy and Technology, 2005. URL: http://silvaeculture.couk/pdfs/BS_CO2_capture_Final_14jan05.pdf (date of access: 25.06.2024).
33. Кунце, В. Технология солода и пива / В. Кунце. СПб.: Профессия. 2001. 912 с.
34. Свирейко, Н. Е. Развитие пищевой промышленности Республики Беларусь: тенденции и перспективы / Н. Е. Свирейко // *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2022. Т. 15, № 4. С. 6–12. [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4\(58\)-6-12](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4(58)-6-12).
35. Павлов, К. В. Современное состояние и тенденции развития пищевой промышленности Республики Беларусь / К. В. Павлов, Е. В. Бубнова // *Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета*. 2023. Т. 3, № 2. С. 164–175. <https://doi.org/10.34130/2070-4992-2023-3-2-164>.
36. Седнин, В. А. Техничко-экономическое сопоставление технических решений для энергоцентров на базе компрессорных станций магистральных газопроводов / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // *Энергия и Менеджмент*. 2017. № 5. С. 26–31.
37. Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий: утв. Департаментом по энергоэффективности Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь от 11 нояб. 2020 г. Минск, 2020. 144 с. URL: https://energoeffect.gov.by/supervision/framework/20201118_terem2.
38. Декларация об уровне тарифов на электрическую энергию, отпускаемую республиканскими унитарными предприятиями электроэнергетики ГПО «Белэнерго» для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей: М-во антимонопольного регулирования и торговли Респ. Беларусь от 06 февр. 2024 г. № 43. URL: https://energo.by/upload/doc/%D0%94%D0%95%D0%9A%D0%9B%D0%90%D0%A0%D0%90%D0%A6%D0%98%D0%AF%20%D1%8D%D1%8D_2024.pdf.
39. Игнатович, Р. С. Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Ч. 1 / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин, Е. С. Зуева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 241–256. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-241-256>.
40. Hydrogen production: fundamentals and case study summaries / K. W. Harrison, R. Remick, G. D. Martin, A. Hoskin // 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC 2010. Book 3: Hydrogen Production Technologies, Part 2: Proceedings of the WHEC, May 16–21 2010 / eds.: D. Stolten, T. Grube. Essen, 2010. P. 207–226. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/34994434.pdf>.
41. Сравнительный анализ различных видов топливных элементов // Cleandex. – URL: <http://www.cleandex.ru/articles/2015/08/08/fuelcell-comparative?ysclid=m1cee27ciz290628098>. – Дата публ.: 08.08.2015.
42. Salameh, Z. Renewable energy system design / Z. Salameh. – Academic Press, 2014. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20257-1>.

43. Архив погоды в Минске / Уручье // rp5.by. URL: https://rp5.by/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B5_%D0%A3%D1%80%D1%83%D1%87%D1%8C%D0%B5 (дата обращения: 20.08.2024).
44. Отопление в жилых домах начинают отключать в Минске // Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь. URL: https://energoeffect.gov.by/news/news_2023/20230417_news2. Дата публ.: 17.04.2023.
45. В Минске начался отопительный сезон. Кому и когда дадут тепло // Минск Новости. URL: <https://minsknews.by/v-minske-nachalsya-otopitelnyj-sezon-komu-i-kogda-dadut-teplo/>. Дата публ.: 09.10.2023.

Поступила 30.10.2024 Подписана в печать 08.01.2025 Опубликовано онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. On the Approval of the Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, December 23, 2015, No. 1084. *National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084> (in Russian).
2. On the state program “Energy Saving” for 2021-2025: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, February 24, 2021, No. 103. *National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103> (in Russian).
3. The Program of Comprehensive Modernization of Energy Production for 2021-2025: Resolution of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus, April 5, 2021, No. 19. Available at: <https://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/2021/%D0%9F%D0%9A%D0%9C%D0%AD%202025-%D1%81.pdf> (in Russian).
4. Bogdan A. A., Ignatovich R. S. (2020) The Synergetic Paradigm and Innovative Solutions in the Field of Energy Security. *Informatsionnye i innovatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii: 5-ya Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Information and Innovative Technologies in Science and Education: 5th All-Russian Scientific and Practical Conference]. Taganrog, 26–30 (in Russian).
5. Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 1. State of Use of Local Fuels in Heat Supply Systems. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (5), 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427> (in Russian).
6. Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 2. Role of Mini-Thermal Power Plant in Heat Supply Systems of Cities and Settlements in Belarus. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (6), 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518> (in Russian).
7. Gubinsky M. V. (2007) Assessment of Greenhouse Gas Emissions from the Use of Fossil Fuels and Biomass. *Integrirovannye tekhnologii i energosberezhenie = Integrated Technologies and Energy Conservation*, (2), 39–42 (in Russian).
8. The Paris Climate Agreement. *Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus*. Available at: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/> (accessed 10 Juny 2023) (in Russian).
9. On the Establishment of a Nationally Determined Contribution of the Republic of Belarus to the Reduction of Greenhouse Gas Emissions by 2030: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus. Belarus, September 29, 2021, No. 553. *National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100553>.

10. IEA (2007) *Biomass for Power Generation and CHP*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1028bee0-2da1-4d68-8b0a-9e5e03e93690/essentials3.pdf> (accessed 18 July 2023).
11. Sánchez-Lozano D., Escámez A., Aguado R., Oulbi S., Hadria R., Vera D. (2023) Techno-Economic Assessment of an Off-Grid Biomass Gasification CHP Plant for an Olive Oil Mill in the Region of Marrakech-Safi, Morocco. *Applied Sciences*, 13 (10), 5965. <https://doi.org/10.3390/app13105965>.
12. Romaniuk V. N., Bobich A. A., Ryzhova T. V., Buby T. V., Yanchuk V. V., Yatsukhna Y. S. (2023) Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (2), 141–157 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-141-157>.
13. Ignatovich R. S., Sednin V. A., Zuyeva Ye. S. (2024) Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (4), 315–331. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-315-331> (in Russian).
14. Ignatovich R. S., Sednin V. A. (2024) Forecasting the Consumption of Thermal Energy to Increase the Involvement of Mini-CHP Plants in the Structure of Energy Production. *Muqobil Energetika = Alternative Energy*, (12, Special issue), 102–106. Available at: https://drive.google.com/file/d/1QuREX-WJupvSv2kCM51ZBsNQQG_zKPtO/view.
15. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2022) Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538> (in Russian).
16. Ignatovich R. S., Sednin V. A. (2022) Technologies for Extracting CO₂ from Combustion Products. *Energetika Belarusi-2022: materialy Respublik. nauch.-prakt. konf., 25–26 maya 2022 g.* [Energy of Belarus-2022. Materials of the Republican Scientific and Practical Conference, May 25-26, 2022]. Minsk, BNTU, 2022, pp. 43–48. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/121697/43-48.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (in Russian).
17. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2023) Analysis of the Efficiency of Hydrogen Production Technology at Mini-CHP Plants Using Local Fuels by Thermochemical Method. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (4), 354–373 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
18. Ignatovich R. S. (2021) Technology of Production of Synthetic Natural Gas on Heat Sources Operating on Solid Fuels. *Energostart: materialy Vseros. molodezh. nauch.-prakt. konf., 12–14 noyab. 2020 g.* [Energostart: Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, November 12-14, 2020]. Kemerovo, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. Available at: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energostart/2020/energostart/pages/Articles/110.pdf> (in Russian).
19. Ignatovich R. S. (2020) Minitepoelectric Power Plant Using Local Fuels with the Option of Producing Synthetic Natural Gas. *Aktual'nye problemy energetiki: materialy 76-i nauch.-tekh. konf. studentov i aspirantov* [Topical Problems of Energy. Proceedings of the 76th Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates]. Minsk, BNTU, 104–107 (in Russian).
20. Viktor Karankevich: “With the Commissioning of the NPP, the Share of Natural Gas in the Energy Balance of Belarus will Decrease to 60%”. *Ministry of Energy of the Republic of Belarus*. Available at: https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-s-vvodom-aes-dolya-prirodnogo-gaza-v-energobalanse-belarusi-snizitsya-do-60-/?sphrase_id=52175 (accessed 01 Juny 2023) (in Russian).

21. Nuclear power and climate change: Decarbonization. *IAEA*. Available at: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-and-climate-change> (accessed 01 November 2024).
22. IRENA (2020). *Power System Organization Structures for the Renewable Energy Era*. Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jan/IRENA_Power_system_structures_2020.pdf (accessed 01 November 2024).
23. Kupriyanov M. S., Kochetkov A. V. (2014) Principles of Technical Self-Organizing Systems Construction. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, (8), 28–32 (in Russian).
24. *Methodological Tool “Tool to Calculate Project or Leakage CO₂ Emissions From Fossil Fuel Combustion”*. Version 02. Available at: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-03-v2.pdf>.
25. Leturcq P. (2013) Wood Preservation (Carbon Sequestration) or Wood Burning (Fossil-Fuel Substitution), which is Better for Mitigating Climate Change? *Annals of Forest Science*, 71 (2), 117–124. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0269-9>.
26. KPMG International (2022) *European Green Deal policy guide*. Available at: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2022/01/green-deal-policy-guide-web-2022.pdf> (accessed 09 June 2024).
27. Kraetskaya O. F., Prokopenya I. N. (Compiled) (2014) 27. *Ecology of Industrial Technologies*. Minsk, BNTU. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/10557> (in Russian).
28. IEA (2020) *Energy Technology Perspectives 2020*. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf.
29. Osipov A., Gayda I., Grushevenko E., Kapitonov S. (2022) *Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technologies*. Scoltech. 79. Available at: https://esg-library.mgimo.ru/publications/tekhnologii-ulavlivaniya-poleznogo-ispolzovaniya-i-khraneniya-dvuokisi-ugleroda-ccus/?utm_source=yandex.by&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.by&utm_referrer=yandex.by (in Russian).
30. Wang A., Lv J., Wang J., Shi K. (2022) CO₂ Enrichment in Greenhouse Production: Towards a Sustainable Approach. *Frontiers in Plant Sciences*, 13, 1029901. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1029901>.
31. State Standard 8050–85. *Gaseous and Liquid Carbon Dioxide. Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 22 (in Russian).
32. *The Opportunities for Reducing GHG Emissions through the Capture of Carbon Dioxide During the Production of Bioethanol: ‘Pumping Carbon from the Atmosphere’* (2005). London, Imperial College Centre for Energy Policy and Technology. 49. Available at: http://silvaeculture.co.uk/pdfs/BS_CO2_capture_Final_14jan05.pdf (accessed 25 June 2024).
33. Kunze W. (1998) *Technologie Brauer und Mälzer*. Berlin, VLB Berlin.
34. Svireyko N. E. (2022) Development of the Food Industry of the Republic of Belarus: Trends and Prospects. *Food Industry: Science and Technology*, 15 (4), 6–12 (in Russian). [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4\(58\)-6-12](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4(58)-6-12).
35. Pavlov K. V., Bubnova E. V. (2023) Current State and Development Trends of the Food Industry of the Republic of Belarus. *Korporativnoe upravlenie i innovacionnoe razvitie ekonomiki Severa: Vestnik Nauchnoissledovatel'skogo centra korporativnogo prava, upravleniya i venchurnogo investirovaniya Syktyvkar'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Corporate Governance and Innovative Development of the Economy of the North: Bulletin of the Research Center for Corporate Law, Management and Venture Investment of Syktyvkar State University], 3 (2), 164–175 (in Russian). <https://doi.org/10.34130/2070-4992-2023-3-2-164>.
36. Sednin V. A., Abrazovskii A. A. (2017) Technical and Economic Comparison of Technical Solutions for Energy Centers Based on Compressor Plants of Main Gas Pipelines. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (5), 26–31 (in Russian).
37. *Methodological Recommendations for the Preparation of Feasibility Studies for Energy-Saving Measures Approved by the Department of Energy Efficiency of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus 11.11.2020*. Minsk, 2020. 144. Available at: https://energoeffekt.gov.by/supervision/framework/20201118_tepem2 (in Russian).

38. *Declaration on the Level of Tariffs for Electric Energy supplied by the Republican Unitary Enterprises of the Electric Power Industry of the SIA Belenergo for Legal Entities and Individual Entrepreneurs*. Ministry of Antimonopoly Regulation and Trade of the Republic of Belarus, 02.06.2024, No 43. Available at: https://www.energo.by/upload/doc/%D0%94%D0%95%D0%9A%D0%9B%D0%90%D0%A0%D0%90%D0%A6%D0%98%D0%AF_%D0%AD%D0%AD_%D0%B8%D1%8E%D0%BB%D1%8C.pdf (in Russian).
39. Ignatovich R. S., Sednin V. A., Zuyeva Ye. S. (2024) Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (4), 315–331 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-315-331>.
40. Harrison K. W., Remick R., Martin G. D., Hoskin A. (2010) Hydrogen production: fundamentals and case study summaries. Stolten D., Grube T. (eds). *18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC 2010. Book 3: Hydrogen Production Technologies, Part 2: Proceedings of the WHEC, May 16-21 2010*. Essen, 207–226. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/34994434.pdf>.
41. Comparative Analysis of Different Types of Fuel Cells. (08 August 2015). *Cleandex*. Available at: <http://www.cleandex.ru/articles/2015/08/08/fuelcell-comparative?ysclid=m1cee27ciz290628098> (in Russian).
42. Salameh Z. (2014) *Renewable Energy System Design*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20257-1>.
43. Weather Archive in Minsk / Uruchye. *rp5.by*. Available at: https://rp5.by/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B5_%D0%A3%D1%80%D1%83%D1%87%D1%8C%D0%B5 (accessed 20 August 2024) (in Russian).
44. Department of Energy Efficiency of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus (17 April 2023) *Heating in Residential Buildings Begins to Turn off in Minsk*. Available at: https://energoeffect.gov.by/news/news_2023/20230417_news2 (in Russian).
45. The Heating Season Has Started in Minsk. To Whom and When They Will Give Heat. (09 October 2023) *Minsk News*. Available at: <https://minsknews.by/v-minske-nachalsya-otopitelnyj-sezon-komu-i-kogda-dadut-teplo> (in Russian).

Received: 30 October 2024

Accepted: 8 January 2025

Published online: 31 January 2025