

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ
ЭНЕРГЕТИКА Том 66, № 4
2023

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Министерство образования Республики Беларусь

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Матренин П. В., Хальясмаа А. И., Гамалей В. В., Ерошенко С. А., Попкова Н. А., Секацкий Д. А., Потачиц Я. В.** Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов k -средних и k -ближайших соседей 305
- Павлович И. А., Барайшук С. М.** Снижение электрического сопротивления заземляющих устройств применением грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля для стабилизации электрофизических параметров грунта 322
- Барукин А. С., Клецель М. Я., Динмуханбетова А. Ж., Амирбек Д. А.** Ввод дополнительного выключателя в блок генератор-трансформатор для энергосбережения в схемах открытых распределительных устройств электростанций 333
- Корнеев А. П., Леневский Г. С., Итонг Нью.** Применение наблюдающего устройства в системе управления для электромеханической системы с распределенными параметрами в механической части 344

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Седнин В. А., Игнатович Р. С.** Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом 354
- Митрофанов А. В., Колибаба О. Б., Габитов Р. Н., Долинин Д. А., Василевич С. В.** Исследование тепло- и массообмена в процессе топливподготовки частицы биомассы с высокой влажностью 374
- Овсянник А. В., Ключинский В. П.** Технико-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на основе диоксида углерода 387

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
П. В. ЖУКОВСКИЙ (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 «Белинвестэнергобережение», Минск, Республика Беларусь)

Ведущий научный редактор Е. И. Корсунская

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

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

Подписано к печати 31.07.2023. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 9,03. Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2023. 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 № 3820000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2023

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 66, No 4
2023

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Ministry of Education of the Republic of Belarus

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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Gamaley V. V., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A., Potachits Y. V.** Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on k -Means and k -Nearest Neighbors Algorithms . . . 305
- Pavlovich I. A. Baraishuk S. M.** Reduction of the Electrical Resistance of Grounding Devices by the Use of a Soil Replacement Mixture Based on Graphite and Hydrogel to Stabilize the Electrophysical Parameters of the Soil . . . 322
- Barukin A. S., Kletsel M. Ya., Dinmukhanbetova A. Zh., Amirbek D. A.** Introduction of an Auxiliary Breaker into the Generator-Transformer Block for Energy Saving in Open Switchgear Circuits of Power Plants . . . 333
- Korneev A. P., Lenevsky G. S., Niu Yitong.** Application of the Surveillance Device in the Control System for an Electromechanical System with Distributed Parameters in its Mechanical Part . . . 344

HEAT POWER ENGINEERING

- Sednin V. A., Ignatovich R. S.** Analysis of the Efficiency of Hydrogen Production Technology at Mini-CHP Plants Using Local Fuels by Thermochemical Method . . . 354
- Mitrofanov A. V., Kolibaba O. B., Gabitov R. N., Dolinin D. A., Vasilevich S. V.** Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Fuel Preparation from Biomass Particles with High Moisture . . . 374
- Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P.** Feasibility Study of Polygeneration Turbine Plants Based on Carbon Dioxide . . . 387

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

- W. T. WÓJCIK* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
V. V. IVASHECHKIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHILEVICH (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. RUMILANTSEV (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 A. I. Karsunskaya

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

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

Passed for printing 31.07.2023. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2023. 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 38200000006896 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2023

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321>

УДК 621.311

Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов k -средних и k -ближайших соседей

П. В. Матренин¹⁾, А. И. Хальясмаа^{1, 2)}, В. В. Гамалей¹⁾, С. А. Ерошенко^{1, 2)},
Н. А. Попкова³⁾, Д. А. Секацкий³⁾, Я. В. Потачиц³⁾

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

²⁾Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(Екатеринбург, Российская Федерация),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Возобновляемые источники энергии рассматриваются как средство снижения углеродного следа топливно-энергетического комплекса, при этом стохастический характер генерации осложняет их интеграцию с электроэнергетическими системами. Эта существенная трудность обуславливает необходимость создавать и совершенствовать методы прогнозирования генерации электрических станций, использующих энергию солнца, ветра и водных потоков. Наиболее важным направлением, обеспечивающим повышение точности прогнозных моделей, является глубокий анализ метеорологических условий как главного фактора, влияющего на выработку электроэнергии. В данной работе предложен и исследован метод адаптации прогнозных моделей под метеорологические условия работы фотоэлектрических станций на базе алгоритмов машинного обучения. При этом вначале выполняется обучение без учителя методом k -средних для формирования кластеров. Для этой задачи также предложено и исследовано использование алгоритма понижения размерности пространства признаков для визуализации оценки точности кластеризации. Затем для каждого кластера построена своя модель машинного обучения для формирования прогнозов и алгоритм k -ближайших соседей для отнесения текущих условий на этапе эксплуатации модели к одному из сформированных кластеров. Исследование было проведено на почасовых метеорологических данных за период с 1985 по 2021 г. Одной из особенностей этого подхода является кластеризация метеоусловий на часовых, а не суточных интервалах. В результате средний модуль относительной ошибки прогнозирования существенно снижается в зависимости от используемой модели прогнозирования. Для наилучшего варианта ошибка прогнозирования генерации фотоэлектрической станции на час вперед составила 9 %.

Ключевые слова: краткосрочное прогнозирование, генерация электроэнергии, фотоэлектрическая станция, возобновляемые источники энергии, метеорологические факторы, инсоляция, солнечная радиация, нейронные сети, кластеризация данных, прогнозная модель, предобработка данных, машинное обучение, метод главных компонент, адаптивный бустинг, линейная регрессия

Для цитирования: Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов k -средних и k -ближайших соседей / П. В. Матренин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321>

Адрес для переписки

Секацкий Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
dsekatski@gmail.com

Address for correspondence

Sekatski Dzmitry A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
dsekatski@gmail.com

Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on k -Means and k -Nearest Neighbors Algorithms

P. V. Matrenin^{1, 2)}, A. I. Khalyasmaa^{1, 2)}, V. V. Gamaley¹⁾, S. A. Eroshenko^{1, 2)}, N. A. Papkova³⁾, D. A. Sekatski³⁾, Y. V. Potachits³⁾

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

²⁾Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russian Federation),

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

Abstract. Renewable energy sources (RES) are seen as a means of the fuel and energy complex carbon footprint reduction but the stochastic nature of generation complicates RES integration with electric power systems. Therefore, it is necessary to develop and improve methods for forecasting of the power plants generation using the energy of the sun, wind and water flows. One of the ways to improve the accuracy of forecast models is a deep analysis of meteorological conditions as the main factor affecting the power generation. In this paper, a method for adapting of forecast models to the meteorological conditions of photovoltaic stations operation based on machine learning algorithms was proposed and studied. In this case, unsupervised learning is first performed using the k -means method to form clusters. For this, it is also proposed to use studied the feature space dimensionality reduction algorithm to visualize and estimate the clustering accuracy. Then, for each cluster, its own machine learning model was trained for generation forecasting and the k -nearest neighbours algorithm was built to attribute the current conditions at the model operation stage to one of the formed clusters. The study was conducted on hourly meteorological data for the period from 1985 to 2021. A feature of the approach is the clustering of weather conditions on hourly rather than daily intervals. As a result, the mean absolute percentage error of forecasting is reduced significantly, depending on the prediction model used. For the best case, the error in forecasting of a photovoltaic plant generation an hour ahead was 9 %.

Keywords: short-term forecasting, electricity generation, photovoltaic plant, renewable energy sources, meteorological factors, insolation, solar radiation, neural networks, data clustering, predictive model, data preprocessing, machine learning, principal component analysis, adaptive boosting, linear regression

For citation: Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Gamaley V. V., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A., Potachits Y. V. (2023) Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on k -Means and k -Nearest Neighbors Algorithms. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321> (in Russian)

Введение

Процессы генерации на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) напрямую определяются природными явлениями. Они имеют стохастическую природу и могут быстро изменяться, поэтому генерация ВИЭ нестабильна и труднопредсказуема. Для солнечных панелей и солнечных электростанций (СЭС) ключевым фактором, влияющим на выработку электрической энергии, является инсоляция, при этом рассматриваются различные горизонты планирования: от краткосрочных (10–30 минут) до долгосрочных (на месяц или год вперед). В зависимости от горизонта планирования и используемых данных применяются физические, статистические, вероятностные модели, а также методы машинного обучения [1–4]. В настоящее время при решении задач прогнозирования инсоляции и генерации СЭС для разных горизонтов планирования ошибка колеб-

лется от 3 % до 20 % [3]. Высокое качество прогнозирования генерации СЭС также необходимо и в контексте обеспечения электроэнергией промышленных объектов или производственных комплексов [5], при этом очень важна предобработка данных [6]. Одним из методов предобработки данных является кластеризация.

Алгоритмы кластеризации для предварительного анализа входных данных и последующего прогнозирования инсоляции или генерации СЭС на практике можно применять различными способами. Можно выделить несколько основных направлений.

Метеорологические параметры используются, чтобы разделить дни на кластеры и затем построить для каждого из них прогнозную модель. Подход, как правило, используется для прогноза на сутки вперед с применением алгоритмов на базе k -средних [7–9]. В работе [10] используются самоорганизующиеся карты Кохонена и k -средних для разделения дней на типовые дни (летние, весенние / осенние, зимние дни без / с постоянным током панели, дни с низкой инсоляцией).

В работе [11] кластеризация выполняется, чтобы разделить дни по параметрам облачности. Также применяются спутниковые данные и алгоритмы компьютерного зрения. Во время обработки изображений они разделяются на кластеры для определения различных типов облачности в течение суток [12]. В работе [13] используются данные для прогнозирования генерации СЭС через модельные значения инсоляции со спутников NASA (с учетом ясного неба). Авторы используют кластерный анализ коэффициента прозрачности атмосферы с помощью разных методов (смеси Гауссовых распределений, k -средних, нечеткой кластеризации C -средних).

Для краткосрочного прогнозирования инсоляции в работе [14] не используются метеорологические факторы. Авторы используют лишь краткосрочные измерения с дискретностью в полчаса за трехчасовой период с помощью модели, выполняя кластеризацию по методу PSA (Part and Select Algorithm). Одна из наиболее сложных моделей предложена в работе [15], где авторы используют модели на базе вейвлет-нейронных сетей, а входные погодноклиматические данные разбивают по временам года. Затем для каждой из четырех групп применяют алгоритм self-organizing map для выделения характерных шаблонов корреляции между инсоляцией и погодой. В работе [16], наоборот, методика очень проста. Используются лишь два кластера с простым правилом разделения: если инсоляция выше 150 Вт/м^2 , то день считается солнечным, если ниже – облачным. Прогнозные модели авторы создают на основе многослойного перцептрона.

Основная часть

Исследуемый объект и исходные данные

В качестве объекта рассмотрена Кемеровская область, источником данных является база метеорологических данных [17]. Средняя суммарная суточная инсоляция показана на рис. 1. На рис. 2 приводятся значения

инсоляции, измеренные для первых недель января, апреля, июля и октября 2021 г. Выработка солнечных панелей определяется метеорологическими факторами. Долгосрочное изменение климата влияет на них, поэтому важно исследовать работу моделей на длительных многолетних выборках данных.

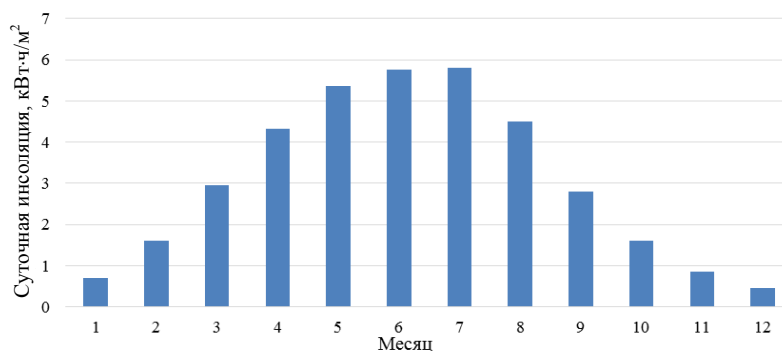


Рис. 1. Суммарная суточная инсоляция

Fig. 1. Total daily insolation

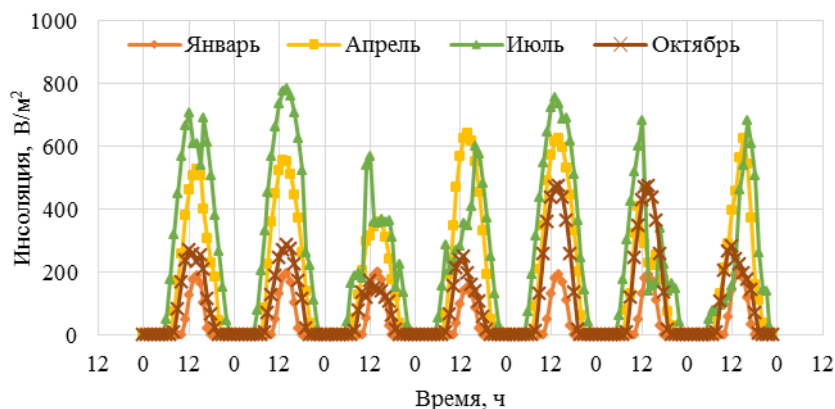


Рис. 2. Примеры почасовых значений инсоляции

Fig. 2. Examples of hourly insolation values

В работе использованы данные с 1 января 1985 г. по 31 декабря 2021 г., содержащие следующие параметры: продолжительность солнечного сияния (мин.); полная инсоляция на горизонтальную поверхность (В/м^2); прямая инсоляция (В/м^2); рассеянная инсоляция (В/м^2); количество осадков (мм); относительная влажность (%); облачность (%); температура ($^{\circ}\text{C}$); скорость ветра (км/ч). Дополнительно была рассчитана выработка солнечной панели для каждого часа с учетом значений инсоляции, угла наклона панели и угла склонения Солнца, а также учтено число солнечных панелей в электростанции (2500). В результате массив данных содержит 324 336 строк (записей) и 14 столбцов (признаков). В массив данных, кроме девяти метеорологических признаков, указанных выше, также входят величина вырабатываемой мощности, год, месяц, день месяца и час суток.

Постановка задачи и метрики точности прогноза

Необходимо построить модель краткосрочного (на один час вперед) прогнозирования выработки солнечной панели по имеющимся метеорологическим данным

$$P_i^* = f(W_{i-1}, W_{i-2}, \dots, W_{i-k}, P_{i-1}, P_{i-2}, \dots, P_{i-k}), \quad (1)$$

где P_i^* – прогнозная мощность солнечной панели в i -й час; f – модель; W_j – вектор значений метеорологических факторов в j -й час ($j = i-1, i-2, \dots, i-k$); P – истинное значение мощности в i -й час.

В работе не используются прогнозы метеорологических факторов, поскольку в этом случае система окажется зависимой от точности прогнозов метеопровайдеров. Для краткосрочного прогнозирования используются данные за k предыдущих часов.

Точность прогноза оценивается на тестовой выборке с использованием метрик mean absolute error (MAE), normalized mean absolute error (nMAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - P_i^*|;$$

$$nMAE = \sum_{i=1}^n |P_i - P_i^*| / \sum_{i=1}^n P_i \cdot 100\%,$$

где n – размер тестовой выборки в часах.

Кластеризация данных

Метеорологические условия отличаются высоким разнообразием, из-за чего построение одной модели, работающей для всех условий, может быть не столь эффективно, как разработка нескольких отдельных моделей, каждая из которых обучается давать прогноз для определенных условий. Под эффективностью здесь понимается не только точность прогноза, но и компактность модели, ведь единая общая модель будет более сложной, следовательно, менее интерпретируемой и иметь более высокий риск переобучения.

Чтобы разделить метеорологические условия, можно прописать ряд правил на основе экспертных знаний, что может быть затруднительно из-за большого числа факторов. Другим способом является применение методов машинного обучения. Алгоритмы обучения без учителя способны разбивать данные на кластеры, учитывая все имеющиеся в выборке данных признаки (параметры). При этом возникает проблема оценки точности кластеризации. Как и в других задачах обучения без учителя, отсутствие правильных ответов не позволяет получить объективную количественную оценку. В данной работе использован следующий подход:

- 1) выполняется кластеризация данных с помощью метода k -средних [18];
- 2) применяется метод главных компонент [19] для понижения размерности данных без учета результатов кластеризации, при этом число признаков уменьшается до двух главных компонент;

3) полученный результат понижения размерности визуализируется с помощью двумерной диаграммы рассеяния, а цвета точек на диаграмме выбираются в соответствии с результатами кластеризации.

Если кластеризация выполнена корректно, то на диаграмме рассеяния кластеры будут локализованы, в ином случае точки разных цветов окажутся перемешанными.

Построение модели прогнозирования

Для каждого кластера создается отдельная регрессионная модель, прогнозирующая выработку солнечных панелей. Для эксплуатации регрессионной модели необходимо определять принадлежность текущих метеорологических условий к какому-либо кластеру. Для этого в данной работе используется еще одна модель, которая выполняет классификацию. Она определяет, к какому кластеру нужно отнести текущие метеорологические условия. Так как для кластеризации используется алгоритм k -средних, то для классификации подходит близкий к нему по своей природе алгоритм k -ближайших соседей (kNN). На рис. 3 приведены укрупненные шаги построения и использования моделей.

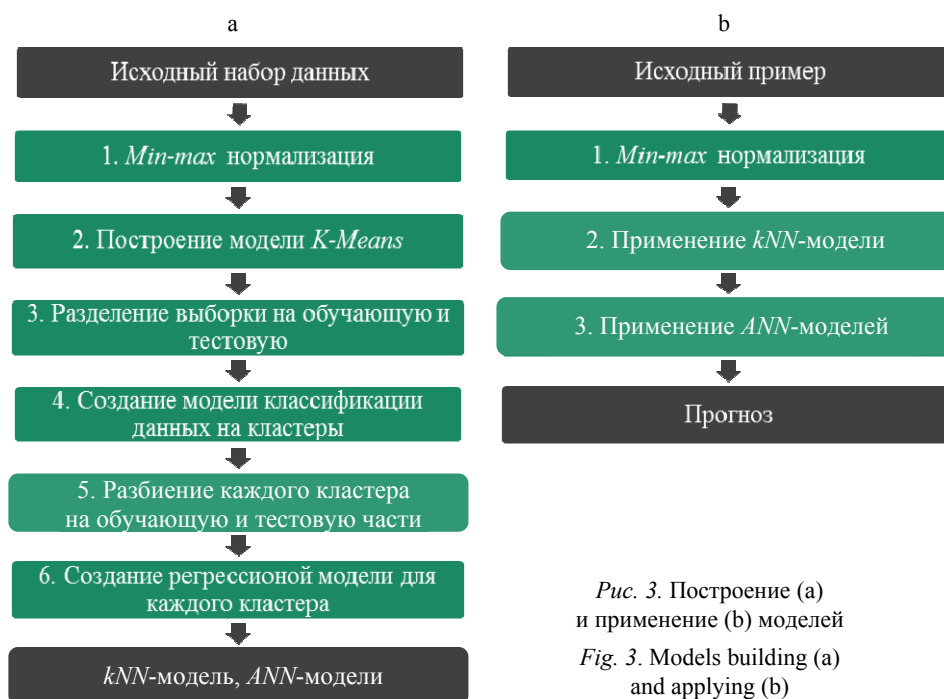


Рис. 3. Построение (а) и применение (б) моделей
Fig. 3. Models building (a) and applying (b)

Этап построения моделей состоит из шести шагов.

1. Поскольку признаки имеют различную природу, первым шагом является нормализация. Все признаки преобразуются с помощью линейной min-max нормализации.

2. Создается модель k -средних, разбивающая данные на кластеры. С помощью визуализации и метода главных компонент проверяется корректность модели.

3. Выборка разделяется на обучающую и тестовую в соотношении 80 на 20 произвольным образом для обучения модели kNN , выполняющей классификацию.

4. Создается модель для классификации данных по кластерам, которая нужна только на этапе использования, на этапе построения она не используется. На этом шаге предполагается обучение, настройка гиперпараметров и тестирование модели.

5. Для каждого кластера нужно обучить свою регрессионную модель, перед этим выполняется разбиение каждого кластера на обучающую и тестовую части.

6. Для каждого кластера создается своя регрессионная модель. Используемые компактные многослойные нейронные сети показывают высокую эффективность в задачах прогнозирования временных рядов в электроэнергетике [20, 21].

Этап применения моделей состоит из трех шагов.

1. Признаки входной порции данных преобразуются с помощью линейной min-max нормализации к шкале от 0 до 1. Используются те значения минимума и максимума, которые определены на этапе построения модели.

2. Применяется классификатор на базе kNN , чтобы определить, к какому кластеру относятся метеорологические условия. При этом используются только данные текущего (ближайшего к прогнозному) часа.

3. Применяется нейросетевая модель, соответствующая определенному на втором шаге кластеру для получения прогноза генерации на час вперед.

Особенности представленного подхода

Можно выделить следующие особенности предложенного подхода:

- большая интерпретируемость по сравнению с созданием единой модели за счет разделения процесса прогнозирования на части;
- использование алгоритмов k -средних и kNN способствует повышению интерпретируемости благодаря их простоте;
- построение разных моделей на базе машинного обучения для разных условий может приводить к более высокой точности прогноза, поскольку каждая модель оказывается сфокусированной на определенных условиях работы;
- применение кластеризации по исходным данным с проверкой по данным после снижения размерности позволяет визуально оценить корректность кластеризации;
- за счет использования k -средних и kNN для кластеризации и последующей классификации модель можно автоматически дообучать на новых данных без риска переобучения;
- использование компактных многослойных нейронных сетей возможно в режиме дообучения, так можно реализовать адаптацию моделей во времени, а с учетом метеорологической адаптации получить климатически-временную адаптацию моделей, что особенно важно в условиях глобального изменения климата.

Предварительный анализ данных и понижение размерности

Выработка электроэнергии СЭС зависит в первую очередь от инсоляции. На этапе предварительного анализа построены зависимости инсоляции от всех остальных признаков. Некоторые из них показаны на рис. 4. Видно, что ни один из признаков по отдельности не может быть использован для точной оценки инсоляции, тем более для прогнозирования. В табл. 1 приведены коэффициенты корреляции Спирмена между генерацией рассматриваемых солнечных панелей и другими параметрами (учитываются только светлые часы суток, когда генерация не равна нулю).

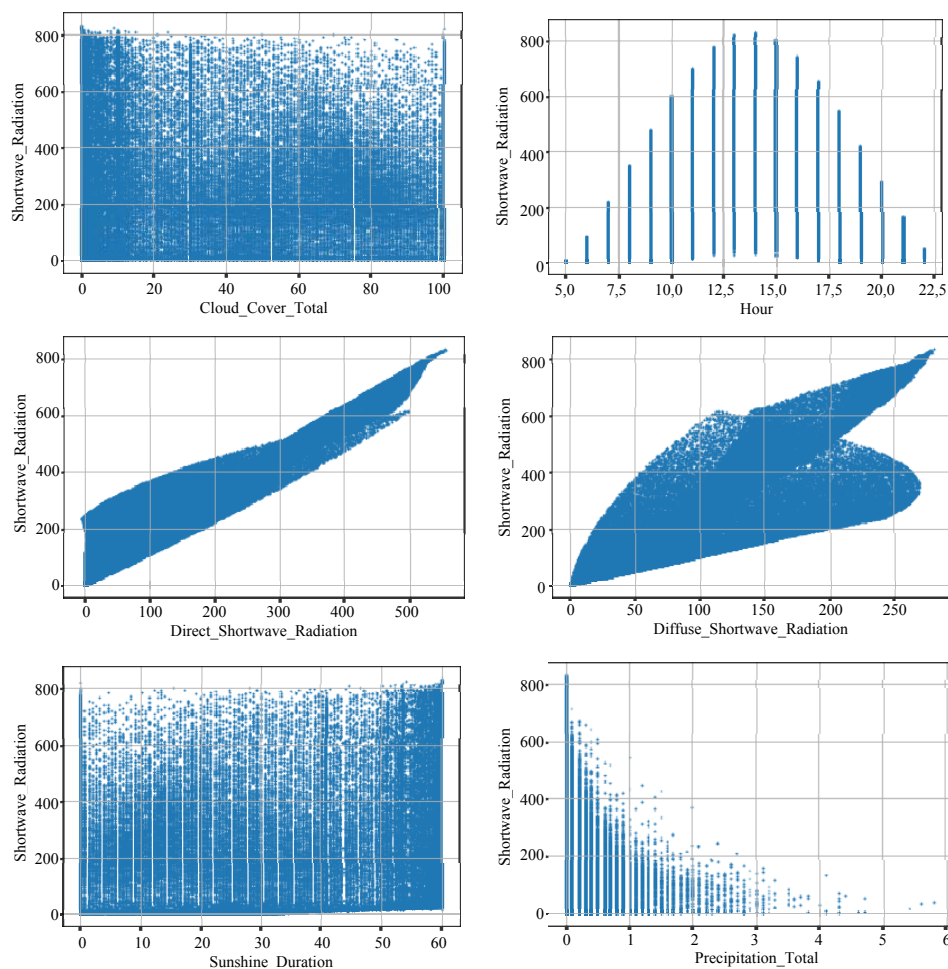


Рис. 4. Зависимости инсоляции от различных факторов

Fig. 4. Dependences of insolation on various factors

Очевидна зависимость факторов между собой. Так, инсоляция представляет собой сумму прямой и рассеянной солнечной радиации, которые, в свою очередь, зависят от облачности. Облачность коррелирует с осадками, осадки с влажностью и т. д. Более наглядно можно увидеть значимость различных факторов, выполнив понижение размерности и отобразив данные на плоскости, при этом используя цвет как третье измерение.

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции Спирмена между генерацией солнечных панелей
и другими параметрами**

Spearman correlation coefficients between solar panel generation and other parameters

Признак	Коэффициент корреляции	Признак	Коэффициент корреляции
Продолжительность солнечного сия- ния	0,29	Температура	0,36
Полная инсоляция	0,86	Скорость ветра	0,06
Прямая инсоляция	0,77	Год	0,00
Рассеянная инсоляция	0,77	Месяц	-0,10
Количество осадков	-0,20	День	-0,01
Относительная влажность	-0,47	Час	-0,01
Облачность	-0,29		

В данной работе мы использовали метод главных компонент для понижения размерности. Данный алгоритм можно отнести к классу алгоритмов машинного обучения без учителя. Результаты приведены на рис. 5.

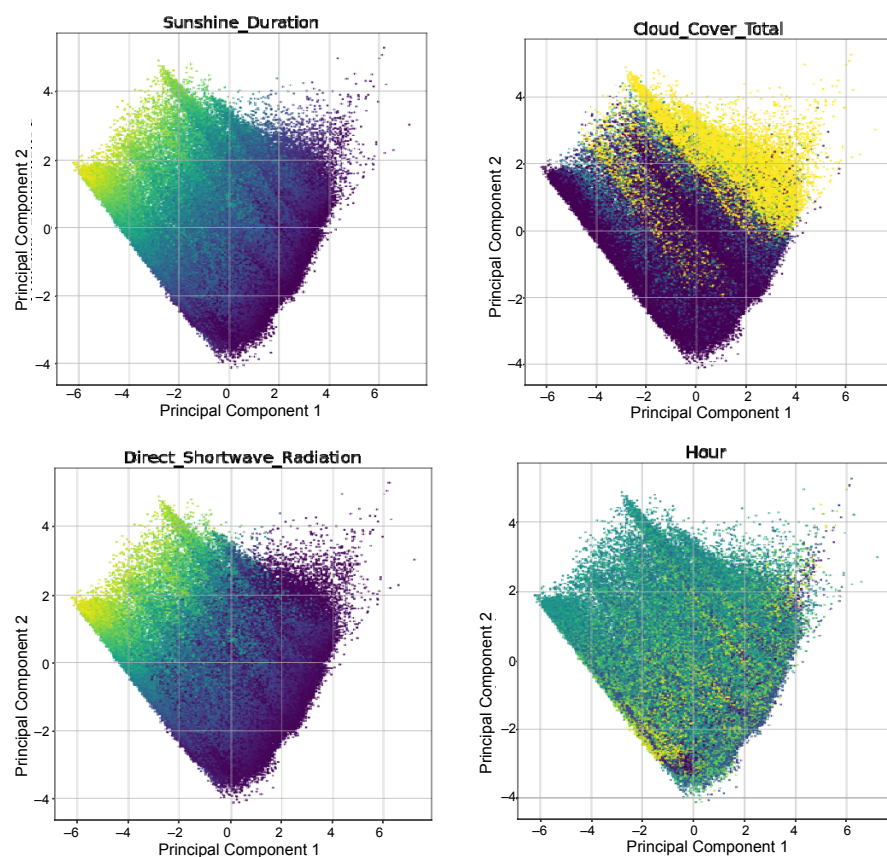


Рис. 5. Результаты визуализации методов главных компонент

Fig. 5. Visualization results of principal component analysis

Кластеризация

Алгоритм кластеризации k -средних является наиболее используемым за счет простоты, интерпретируемости и широкой области применения. Последний пункт отличает его от таких алгоритмов, как спектральная кластеризация, *DBSCAN*, *BIRCH* или иерархическая кластеризация, которые имеют свои определенные области применения [22]. Необходимо выбрать число кластеров, исходя из того, что для каждого будет создана своя прогнозная модель. На рис. 6 приведены результаты кластеризации при разном числе кластеров. При кластеризации используются только часы светлого времени суток.

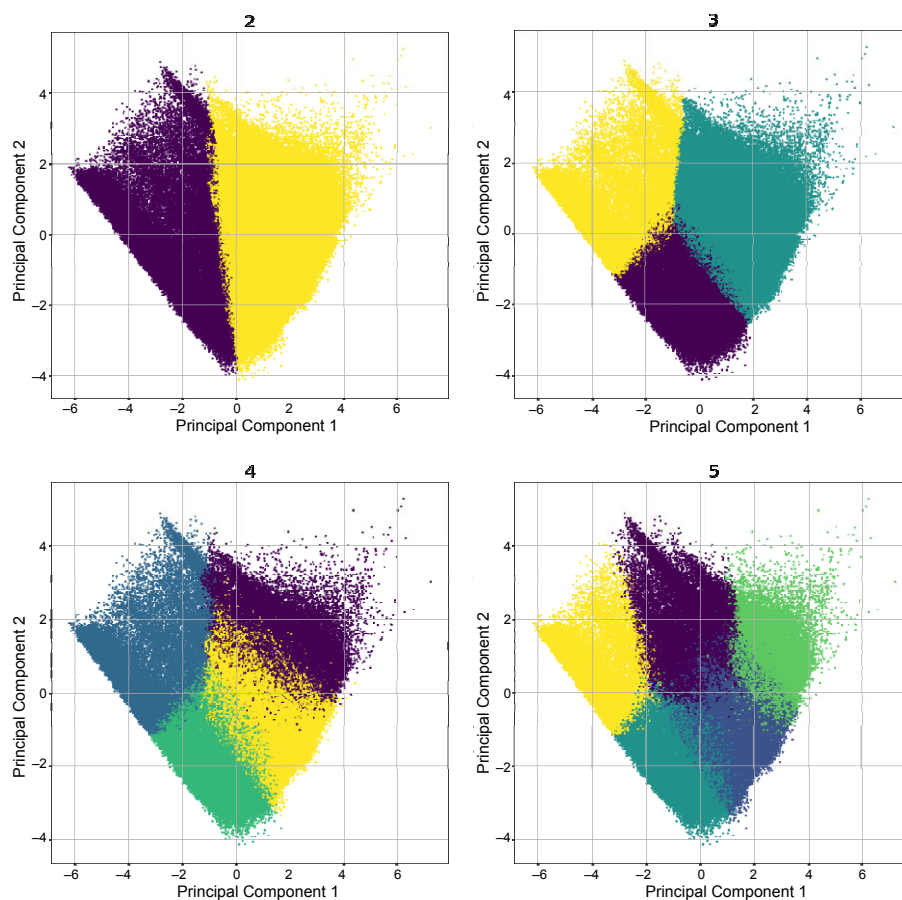


Рис. 6. Результаты кластеризации при разном числе кластеров

Fig. 6. Clustering results for different number of clusters

Было выбрано четыре кластера, поскольку в этом случае границы между кластерами получаются более четкими, чем при пяти. В то же время два и три кластера недостаточно с точки зрения разделения прогнозирования на несколько моделей для различных условий. Использование кластеризации на исходных данных с проверкой ее работы на данных после пони-

жения размерности позволяет оценить корректность кластеризации. Если выполнить кластеризацию после понижения размерности, то будут получены кластеры с четкими границами, независимо от того, отражают ли они внутренние зависимости между различными признаками в данных, как показано на рис. 7.

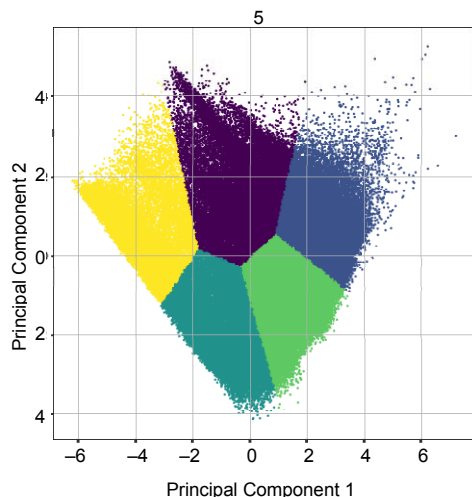


Рис. 7. Результаты кластеризации, выполненной после понижения размерности

Fig. 7. Results of clustering performed after dimensionality reduction

При тестировании разделения условий по ранее сформированным кластерам использованы следующие показатели точности:

$$Recall = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \frac{TP_c}{TP_c + FN_c};$$

$$Precision = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \frac{TP_c}{TP_c + FP_c},$$

где C – число кластеров (4); TP_c – число объектов кластера c , которые модель отнесла к кластеру c ; FN_c – число объектов кластера c , которые модель отнесла к другому кластеру; FP_c – число объектов любого кластера кроме c , которые модель отнесла к кластеру c .

Результаты приведены в табл. 2. При этом обучающая выборка содержит 81 % данных (1985–2014 гг.), тестовая – 19 % (2015–2021 гг.). При использовании трех кластеров точность совсем немного выше, чем при четырех, поэтому далее использована кластеризация с разделением на четыре кластера. Таким образом, точность распределения метеорологических условий по кластерам высокая (95 %). При этом ошибки классификации не являются критичными, поскольку они происходят на границах кластеров, то есть в пограничных метеорологических условиях. Поэтому выбор не той модели, которая построена для этого кластера, а иной, не является серьезной ошибкой.

Таблица 2

Результаты кластеризации метеорологических факторов по кластерам

Clustering results of meteorological factors by clusters

C	Кластер	Обучающая выборка, Recall, %	Обучающая выборка, Precision, %	Тестовая выборка, Recall, %	Тестовая выборка, Precision, %
4	1	96	97	92	93
4	2	97	97	95	97
4	3	97	98	96	97
4	4	97	98	95	92
4	Среднее	97	97	95	95
3	1	98	97	96	96
3	2	97	97	96	95
3	3	99	99	98	98
3	Среднее	98	98	97	97

Построение регрессионных моделей

В работе рассмотрены три вида моделей машинного обучения: линейная регрессия, адаптивный бустинг деревьев решений [23] и многослойная компактная нейронная сеть. Модели построены в соответствии с выражением (1), при этом использованы данные за шесть предыдущих часов ($k = 6$). Настройка параметров выполнялась экспериментально. Для адаптивного бустинга использовано 10 деревьев максимальной глубиной 10, остальные параметры использованы по умолчанию [24]. Для нейронной сети использована следующая архитектура из пяти слоев: входной, три скрытых слоя (32, 32, 8 нейронов, функция активации *ReLU*), выходной слой с сигмоидальной функцией активации.

Использован метод обучения *Adam*. Реализация нейронной сети выполнена с помощью библиотеки *Keras*. В табл. 3 приведены результаты обучения указанных моделей с использованием кластеризации и без нее. На рис. 8 и 9 показано наложение прогноза лучшей модели на истинные значения для зимнего и летнего месяцев тестовой выборки.

Таблица 3

Результаты краткосрочного прогнозирования генерации

Results of short-term generation forecasting

Модель	Используется ли кластеризация	MAE, кВт	nMAE, %
LR	нет	28,55	18,12
LR	да	21,50	13,46
Эффект от кластеризации, %	24,7		
AB	нет	19,68	12,45
AB	да	16,25	10,31
Эффект от кластеризации, %	17,1		
ANN	нет	17,65	11,20
ANN	да	13,62	8,58
Эффект от кластеризации, %	22,8		

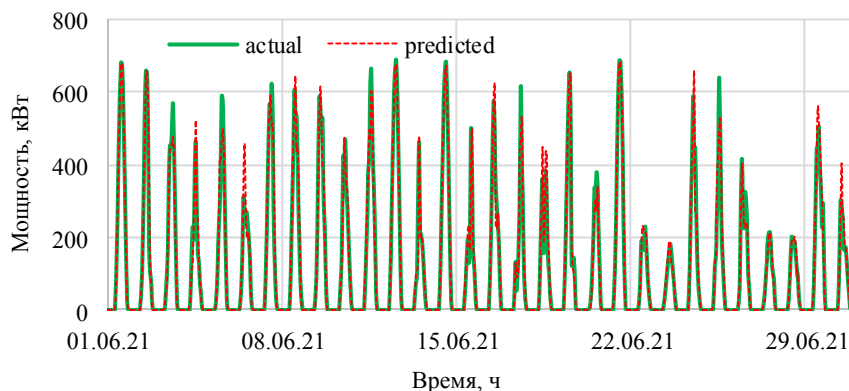


Рис. 8. Сравнение истинных и прогнозных значений выработки СЭС, июнь 2021 г.

Fig. 8. Comparison of actual and predicted solar power generation, June 2021

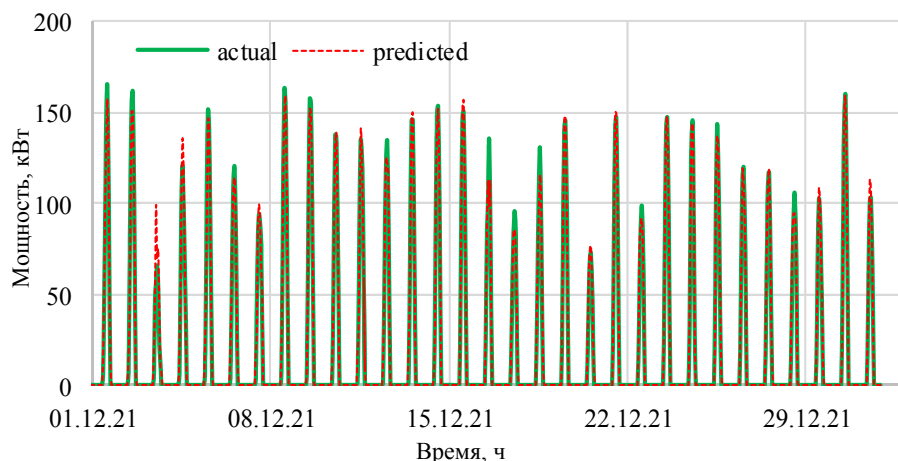


Рис. 9. Сравнение истинных и прогнозных значений выработки СЭС, декабрь 2021 г.

Fig. 9. Comparison of actual and predicted solar power generation, December 2021

ВЫВОД

Предложен и апробирован на данных многолетних метеорологических наблюдений метод краткосрочного прогнозирования генерации фотоэлектрических станций с адаптацией климатической модели краткосрочного прогнозирования. Особенностью метода является кластеризация часовых значений метеоусловий и создание отдельных моделей машинного обучения для каждого кластера. В результате отдельные модели оказываются более простыми и точными, поскольку каждая сфокусирована на определенных условиях работы. В результате экспериментов определено, что предложенная кластеризация снижает ошибку прогнозирования регрессионных

моделей на 17–25 %. Итоговая ошибка прогнозирования при использовании четырех кластеров и компактных многослойных нейронных сетей составила 8,6 % при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,96$.

За счет использования простых, надежных и не склонных к переобучению алгоритмов k -средних, kNN и компактных многослойных нейронных сетей систему прогнозирования можно автоматически дообучать на новых данных без риска переобучения. Таким образом, в дальнейшем предполагается реализовать адаптацию моделей во времени. С учетом метеорологической адаптации будет реализована климатически-временная адаптация моделей, что особенно важно для создания интеллектуальных информационно-аналитических систем, которые будут надежно работать при изменении условий функционирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00181).

ЛИТЕРАТУРА

1. El hendouzi, A. Solar Photovoltaic Power Forecasting / A. El hendouzi, A. Bourouhou // Journal of Electrical and Computer Engineering. 2020. Vol. 2020. P. 1–21. <https://doi.org/10.1155/2020/8819925>.
2. Review of photovoltaic power forecasting / J. Antonanzas [et al.] // Solar Energy. 2016. Vol. 136. P. 78–111. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.069>.
3. Machine Learning Methods for Solar Radiation Forecasting: a Review / C. Voyant [et al.] // Renewable Energy. 2017. Vol. 105. P. 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095>.
4. Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма / А. М. Брамм [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 4. С. 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>.
5. Industry Experience of Developing Day-Ahead Photovoltaic Plant Forecasting System Based on Machine Learning / A. I. Khalyasmaa [et al.] // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, Iss. 20. P. 3420. <https://doi.org/10.3390/rs12203420>.
6. The Impact of Data Filtration on the Accuracy of Multiple Time-Domain Forecasting for Photovoltaic Power Plants Generation / S. A. Eroshenko [et al.] // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, Iss. 22. P. 8265. <https://doi.org/10.3390/app10228265>.
7. Rana, M. Solar Power Forecasting Using Weather Type Clustering and Ensembles of Neural Networks / M. Rana, I. Koprinska, V. G. Agelidis // International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2016. P. 4962–4969. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727853>.
8. Solar Radiation Intensity Probabilistic Forecasting Based on K-Means Time Series Clustering and Gaussian Process Regression / Z. Zhang [et al.] // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 89079–89092. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3077475>.
9. Unsupervised Clustering-Based Short-Term Solar Forecasting / C. Feng [et al.] // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2021. Vol. 10, Iss. 4. P. 2174–2185. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2881531>.
10. Unsupervised Clustering of Battery Waveforms in Off-Grid PV Installations / I. Sanz-Gorrachategui [et al.] // 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and

- Renewable Energies (EVER). Monte-Carlo, Monaco, 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/EVER48776.2020.9242942>.
11. Development of Algorithm for Day Ahead PV Generation Forecasting Using Data Mining Method / M. C. Kang [et al.] // Proc. Int. IEEE 54th Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Seoul, Korea (South): IEEE, 2011. P. 1–4 <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2011.6026333>.
 12. Pattern Classification and PSO Optimal Weights Based Sky Images Cloud Motion Speed Calculation Method for Solar PV Power Forecasting / F. Wang [et al.] S // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Portland, OR, USA: IEEE, 2018. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544468>.
 13. Daily Clearness Index Profiles Cluster Analysis for Photovoltaic System / C. S. Lai [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. Vol. 13, Iss. 5. P. 2322–2332. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2683519>.
 14. Severiano, C. Very Short-Term Solar Forecasting Using Multi-Agent System Based on Extreme Learning Machines and Data Clustering / C. Severiano, F. G. Guimarães, M. W. Cohen // 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Athens, Greece: IEEE, 2016. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2016.7850162>.
 15. Yang, Y. Short-Term PV Generation System Direct Power Prediction Model on Wavelet Neural Network and Weather Type Clustering / Y. Yang, L. Dong // 2013 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou, China: IEEE, 2013. P. 207–211. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2013.56>.
 16. Day-Ahead Photovoltaic Forecasting: A Comparison of the Most Effective Techniques / N. Alfredo [et al.] // Energies. 2019. Vol. 12, Iss. 9. P. 1621. <https://doi.org/10.3390/en12091621>.
 17. Meteoblue [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.meteoblue.com/en/weather>. Date of access: 13.05.2022.
 18. Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction / A. N. Gorban [et al.] // Berlin: Springer, 2008. 364 p. (Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol. 58). https://doi.org/10.1007/978-3-540-73750-6_5.
 19. Hartigan, J. A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm / J. A. Hartigan, M. A. Wong // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1979. Vol. 28, No 1. P. 100–108. <https://doi.org/10.2307/2346830>.
 20. Improving Accuracy and Generalization Performance of Small-Size Recurrent Neural Networks Applied to Short-Term Load Forecasting / P. V. Matrenin [et al.] // Mathematics. 2020. Vol. 8. Iss. 12. P. 2169. <https://doi.org/10.3390/math8122169>.
 21. Матренин, П. В. Устойчивое краткосрочное прогнозирование скорости ветра с помощью адаптивных компактных нейронных сетей / П. В. Матренин, В. З. Манусов, Е. А. Игумнова // Проблемы региональной энергетики. 2020. Т. 7, №47. С. 69–80. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4018960>.
 22. Clustering [Electronic Resource] // Scikit-Learn. Machine Learning in Python. Mode of access: <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html>. Date of access: 13.04.2022.
 23. Drucker, H. Improving Regressors using Boosting Techniques / H. Drucker // Proceedings of the 14th International Conference on Machine Learning (ICML). Citeseer, 1997. P. 107–115.
 24. Adaptive Boosting [Electronic Resource] // Scikit-Learn. Machine Learning in Python. Mode of access: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.SGDRegressor.html?highlight=adaptive+busting. Date of access: 13.04.2022.

Поступила 18.10.2022 Подписана в печать 28.12.2022 Опубликовано онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. El hendouzi A., Bourouhou A. (2020) Solar Photovoltaic Power Forecasting. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020, 1–21. <https://doi.org/10.1155/2020/8819925>.

2. Antonanzas J., Osorio N., Escobar R., Urraca R., Martinez-de-Pison F. J., Antonanzas-Torres F. (2016) Review of Photovoltaic Power Forecasting *Solar Energy*, 136, 78–111. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.069>.
3. Voyant C., Notton G., Kalogirou S., Nivet M. L., Paoli C., Motte F., Fouilloy A. (2017) Machine Learning Methods for Solar Radiation Forecasting: a Review. *Renewable Energy*, 105, 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095>.
4. Bamm A. M., Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Matrenin P. V., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2022) Topology Optimization of the Network with Renewable Energy Sources Generation Based on a Modified Adapted Genetic Algorithm. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354> (in Russian).
5. Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Tashchilin V. A., Ramachandran H., Piepur Chakravarthi T., Butusov D. N. (2020) Industry Experience of Developing Day-Ahead Photovoltaic Plant Forecasting System Based on Machine Learning. *Remote Sensing*, 12 (20), 3420. <https://doi.org/10.3390/rs12203420>.
6. Eroshenko S. A., Khalyasmaa A. I., Snegirev D. A., Dubailova V. V., Romanov A. M., Butusov D. N. (2020) The Impact of Data Filtration on the Accuracy of Multiple Time-Domain Forecasting for Photovoltaic Power Plants Generation. *Applied Sciences*, 10 (22), 8265. <https://doi.org/10.3390/app10228265>.
7. Rana M., Koprinska I., Agelidis V. G. (2016) Solar Power Forecasting Using Weather Type Clustering and ensembles of Neural Networks *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 4962–4969. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727853>.
8. Zhang Z., Wang C., Peng X., Qin H., Lv H., Fu J., Wang H. (2021) Solar Radiation Intensity Probabilistic Forecasting Based on K-Means Time Series Clustering and Gaussian Process Regression *IEEE Access*, 9, 89079–89092. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3077475>.
9. Feng C., Cui M., Hodge B. M., Lu S., Hamann H. F., Zhang J. (2021) Unsupervised Clustering-Based Short-Term Solar Forecasting. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10 (4), 2174–2185. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2881531>.
10. Sanz-Gorrachategui I., Pastor-Flores P., Guillén-Asensio A., Artal-Sevil J. S., Bono-Nuez A., Martín-del-Brio B., Bernal-Ruiz C. (2020) Unsupervised Clustering of Battery Waveforms in Off-Grid PV Installations. *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. Monte-Carlo, Monaco, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EVER48776.2020.9242942>.
11. Kang M. C., Sohn J. M., Park J. Y., Lee S. K., Yoon Y. T. (2011) Development of Algorithm for Day Ahead PV Generation Forecasting Using Data Mining Method. *IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Seoul, Korea (South), IEEE, 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2011.6026333>.
12. Wang F., Pang S., Zhen Z., Li K., Ren H, Shafie-Khah M., Catalão J. P. S. (2018) Pattern Classification and PSO Optimal Weights Based Sky Images Cloud Motion Speed Calculation Method for Solar PV Power Forecasting *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. Portland, OR, USA, IEEE, 1–9. <https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544468>.
13. Lai C. S., Jia Y., McCulloch M. D., Xu Z. (2017) Daily Clearness Index Profiles Cluster Analysis for Photovoltaic System *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13 (5), 2322–2332 <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2683519>.
14. Severiano C., Guimarães F. G., Cohen M. W. (2016) Very Short-Term Solar Forecasting Using Multi-Agent System Based on Extreme Learning Machines and Data Clustering. *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. Athens, Greece, IEEE, 1–8. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2016.7850162>.
15. Yang Y., Dong L. (2013) Short-Term PV Generation System Direct Power Prediction Model on Wavelet Neural Network and Weather Type Clustering *2013 5th International Conference*

- on *Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. Hangzhou, China, IEEE, 207–211. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2013.56>.
16. Alfredo N., Ogliari E., Leva S., Pavan A. M., Mellit A., Lughi V., Dolara A. (2019) Day-Ahead Photovoltaic Forecasting: A Comparison of the Most Effective Techniques *Energies*, 12 (9), 1621. <https://doi.org/10.3390/en12091621>.
 17. *Meteoblue*. Available at: <https://www.meteoblue.com/en/weather>.
 18. Gorban, A. N., Kegl B., Wunsch D. C., Zinovyev A. (2008) *Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol 58*. Berlin, Springer. 364. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73750-6_5.
 19. Hartigan J. A., Wong M. A. (1979) Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28 (1), 100–108. <https://doi.org/10.2307/2346830>.
 20. Matrenin P. V., Manusov V. Z., Khalyasmaa A. I., Antonenkov D. V., Eroshenko S. A., Butusov D. A. (2020) Improving Accuracy and Generalization Performance of Small-Size Recurrent Neural Networks Applied to Short-Term Load Forecasting *Mathematics*, 8 (12), 2169. <https://doi.org/10.3390/math8122169>.
 21. Matrenin P. V., Manusov V. Z., Igumnova E. A. (2020) Robust Short-Term Wind Speed Forecasting Using Adaptive Shallow Neural Networks. *Problems of The Regional Energetics*, 3 (47), 69–80. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4018960> (in Russian).
 22. Clustering. *Scikit-Learn. Machine Learning in Python*. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html>.
 23. Drucker H. (1997) Improving Regressors using Boosting Techniques. *Proceedings of the 14th International Conference on Machine Learning (ICML)*. Citeseer, 107–115.
 24. Adaptive Boosting. *Scikit-Learn. Machine learning in Python*. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.SGDRegressor.html?highlight=adaptive+busting.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332>

УДК 621.316.99

Снижение электрического сопротивления заземляющих устройств применением грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля для стабилизации электрофизических параметров грунта

И. А. Павлович¹⁾, С. М. Барайшук¹⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат: В статье рассмотрены факторы, влияющие на электрическое сопротивление растекания тока заземляющего устройства; электрофизические параметры грунта, влияющие на его удельное сопротивление, и учет таких параметров при проектировании заземляющих устройств. Показано, что удерживание влаги в околоэлектродном пространстве заземлителя, а также поддержание ее на определенном уровне способствуют улучшению качества и надежности работы заземления. Установлена связь между способностью удерживать влагу и величиной сезонных колебаний электрического сопротивления грунта, а также коэффициентом сезонности, учитывающим изменения при разных климатических условиях окружающей среды. Рассмотрены вопросы применения различных способов снижения удельного сопротивления грунта при монтаже заземляющих устройств. Одним из основных способов снижения сопротивления заземления является применение растворов различных минеральных солей. Этот метод не оптимален, так как ускоряет коррозионные процессы в материалах электродов заземления. Также рассмотрены и другие способы снижения сопротивления контура заземления. В частности, авторами предложен метод уменьшения сопротивления заземляющего устройства на основе метода частичной замены грунта в околоэлектродной области на смесь с более низким удельным сопротивлением на основе графита и гидрогеля, способной собирать влагу. Данный тип смеси является экологически безопасным при применении и не агрессивным к материалу заземляющего контура. Принцип работы смеси основан на том, что гидрогель позволяет стабилизировать влажность в месте закладки контура, а графит повышает общую проводимость смеси. В работе представлены результаты лабораторных исследований, которые проводились согласно ГОСТ 9.602–2016. Для этого контрольные образцы помещались в емкости из непроводящего материала (оргстекло) и осуществлялись измерения зависимости удельного сопротивления от влажности, температуры, удельного содержания графита и гидрогеля. В статье приведены графики зависимостей удельного сопротивления смеси от влажности, температуры, количественного содержания гидрогеля. Из полученных результатов можно сделать вывод о возможности применения смеси в энергетике для повышения надежности работы электроустановок и обеспечения электробезопасности.

Ключевые слова: заземление, грунтозамещающая смесь, коэффициент сезонности, графит, гидрогель, влажность, электролитический заземлитель

Для цитирования: Павлович, И. А. Снижение электрического сопротивления заземляющих устройств применением грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля для стабилизации электрофизических параметров грунта / И. А. Павлович, С. М. Барайшук // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 322–332. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332>

Адрес для переписки

Барайшук Сергей Михайлович
УО «Белорусский государственный аграрный
технический университет»
просп. Независимости, 99,
223023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 775-76-37
bear_s@rambler.ru

Address for correspondence

Baraishuk Siarhei M.
Belarusian State Agrarian
Technical University
99, Nezavisimosty Ave.,
223023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 775-76-37
bear_s@rambler.ru

Reduction of the Electrical Resistance of Grounding Devices by the Use of a Soil Replacement Mixture Based on Graphite and Hydrogel to Stabilize the Electrophysical Parameters of the Soil

I. A. Pavlovich¹⁾, S. M. Baraishuk¹⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract: This article discusses the factors that affect the electrical resistance of the current spreading of the grounding device. The issue of the electrophysical parameters of the soil that affect its resistivity and the consideration of such parameters in the design of grounding devices is considered. It is shown that keeping moisture in the near-electrode space of the grounding electrode, as well as maintaining it at a certain level, facilitates improving the quality and reliability of the grounding. A relationship has been established between the ability to retain moisture and the magnitude of seasonal fluctuations in the electrical resistance of the soil, and also the season factor, which takes into account changes under different climatic environmental conditions. The issues of application of various methods of reducing the resistivity of the soil during mounting of grounding devices are considered. One of the main ways to reduce ground resistance is the use of solutions of various mineral salts. This method is not optimal, as it accelerates the corrosion processes in the materials of the ground electrodes. Therefore, the paper also considers other ways to reduce the resistance of the ground loop; in particular, the authors propose a method for reducing the resistance of a grounding device based on the method of partial replacing the soil in the near-electrode region with a mixture with a lower resistivity capable of collecting moisture based on graphite and hydrogel. This type of mixture is environmentally friendly when used, as well as it is non-aggressive to the material of the ground loop. The principle of operation of this mixture is based on the fact that the hydrogel makes it possible to stabilize the moisture at the site of laying the circuit, while graphite increases the overall conductivity of the mixture. The paper presents the results of laboratory studies, which have been carried out in accordance with GOST 9.602–2016. For this purpose, control samples were placed in containers made of a non-conductive material (plexiglas) and dependence of resistivity on moisture, temperature, specific content of graphite and hydrogel was measured. The article presents graphs of the dependences of the mixture specific resistance on moisture, temperature, and the quantitative content of the hydrogel. From the results obtained, it can be concluded that the mixture can be used in the energy sector to improve the reliability of electrical installations and ensure electrical safety.

Keywords: grounding, soil-substituting mixture, season factor, graphite, hydrogel, moisture, electrolytic grounding

For citation: Pavlovich I. A. Baraishuk S. M. (2023) Reduction of the Electrical Resistance of Grounding Devices by the Use of a Soil Replacement Mixture Based on Graphite and Hydrogel to Stabilize the Electrophysical Parameters of the Soil. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 322–332. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332> (in Russian)

Введение

Заземляющее устройство (ЗУ) важная часть технических мероприятий, обеспечивающих надежную работу электроустановок, применяемых для защиты человека от поражения электрическим током при случайном прикосновении к токопроводящим частям электрооборудования.

Электрическое сопротивление ЗУ зависит от множества факторов: непосредственное электрическое сопротивление материалов заземляющих электродов, качество выполнения контактных соединений элементов кон-

тура заземления, конфигурация (эти факторы определяются качеством выполнения работ), а также удельное сопротивление грунта в околоэлектродном пространстве и коэффициент сезонного изменения удельного сопротивления грунта, внимание которым уделяют только в случае высоких удельных сопротивлений.

В свою очередь для удельного сопротивления грунта определяющими параметрами являются состав, влажность и температура [1, 2]. Удельное сопротивление определяет свойства грунта создавать благоприятные свойства для растекания тока, возникающего вследствие замыкания на корпус электрооборудования в аварийных ситуациях, а также возникновения напряжения в металлических элементах конструкций зданий и сооружений.

Для Беларуси значения удельного электрического сопротивления грунтов идентичных типов во всех областях отличаются незначительно и могут быть приняты усредненными. В других грунтах, за исключением песка, ожидаемое удельное электрическое сопротивление не превышает 600 Ом·м [3], однако коэффициент сезонности может достигать значения 4. Удельное сопротивление зависит от типов почвы (песок, глина, известняк), размеров и плотности прилегания частиц, влажности и температуры, а также химического состава почвы, наличия в ней кислот, солей, щелочей [4].

Состояние рассматриваемого вопроса

Согласно исследованиям [1], влияние пористости почвы и способности удерживать влагу непосредственно влияет на удельное сопротивление грунта. Результаты научных изысканий [1] показывают, что при высокой степени минерализации грунта, обусловленной содержанием ионов растворов солей, содержащихся в почве, удельное сопротивление растеканию электрического тока снижается. Исходя из этого можно сделать вывод, что увеличение способности грунта удерживать влагу, стабилизировать влажность в околоэлектродном пространстве способствует улучшению свойств заземляющего устройства.

Также одним из факторов, влияющих на способность ЗУ выполнять свои функции, является глубина промерзания почвы [5]. Коэффициент сезонности сопротивления ЗУ указывает на изменение сопротивления контура в зависимости от климатических условий той или иной местности, а также на температурный режим почвы. Колебание сопротивления ЗУ в течение года приводит к необходимости увеличения количества электродов в контуре, глубины их залегания, чтобы компенсировать сезонное увеличение сопротивления. Необходимость обеспечивать регламентируемую величину сопротивления контура приводит к перерасходу материалов заземляющих проводников, увеличению объема производимых монтажных работ, что сказывается на увеличении затрат.

При монтаже контуров заземления применяются различные способы уменьшения сопротивления заземляющих устройств, такие как использование различных типов материалов электродов, а также применение разных видов добавок (электролитов) и замена грунта в околоэлектрод-

ном пространстве иным, имеющим более низкое удельное сопротивление, чем исходный грунт [6].

Согласно зарубежным исследованиям, удельное сопротивление грунта может быть уменьшено применением в околоэлектродном пространстве хлорида натрия, сульфата магния, сульфата меди и хлорида кальция или аналогичных веществ [7, 8]. Наибольшее распространение получило применение поваренной соли и сульфата магния [9]. Данный способ сводится к обработке околоэлектродного пространства, чтобы не было непосредственного контакта с электродом заземляющего устройства. Эту обработку необходимо периодически повторять вследствие вымывания этих веществ, также их использование увеличивает скорость корродирования материалов, из которых выполняется заземляющий контур. Для предотвращения скорого разрушения электродов появляется необходимость применения защитных покрытий, которые должны иметь достаточную проводимость [9]. Поэтому применение данного метода ограничено из-за повышенных капиталовложений в строительство ЗУ.

Другим методом уменьшения сопротивления грунта, а как следствие, и всего ЗУ является применение заземляющих электродов в бетонной оболочке. Бетонная оболочка ниже уровня грунта представляет собой полупроводниковую среду с удельным сопротивлением около 30 Ом·м при 20 °С или несколько ниже, чем у среднего суглинка [1]. Использование заземлителя с бетонным покрытием, содержащим песок, нитрофоску, графит, цемент в нужных количествах, способствует обеспечению необходимой проводимости и срока эксплуатации ЗУ [10].

В Российской Федерации широкое распространение получило использование смесей минерального активатора грунта. Эта смесь представляет собой электропроводящий полусухой электролит. Применение данного способа эффективно только совместно с полыми перфорированными электродами заземлителя, устойчивыми к коррозии. Как правило, они изготавливаются из толстостенной трубы нержавеющей стали. При взаимодействии с почвой смесь диффундирует, образуя электролит [11]. Основной проблемой использования данного метода является повышенная коррозия как самих электродов, так и стальных элементов других конструкций, расположенных в непосредственной близости от них.

Еще одним способом уменьшения удельного электрического сопротивления грунта является использование углеродосодержащих порошков (графит). Этот метод позволяет повысить проводимость в грунтах, обладающих очень высоким электрическим сопротивлением (порядка 400–600 Ом·м), но имеет низкую эффективность при сопротивлении ниже 100 Ом·м [9].

Применение омедненных заземлителей рекомендуется [14] в почвах с высоким удельным сопротивлением. Сам медный электрод имеет более низкие механические характеристики по сравнению со сталью, поэтому более широкое хождение получили омедненные электроды, полученные электрохимическим способом. Толщина медного слоя достигается в районе 250 мкм, этого достаточно для снижения сопротивления растеканию тока.

Однако применение омедненных и оцинкованных элементов систем заземления приводит к ухудшению работы ЗУ. Это связано с тем, что медь, которая обладает положительным стандартным потенциалом, совместно с углеродистой низколегированной сталью, имеющей отрицательный стандартный потенциал, приводит к повышенной коррозии в местах соединения [12].

Еще одним решением, снижающим сопротивление контура заземления, является использование глубинных заземлителей длиной более 15 м. Целесообразность их применения в электросетевом строительстве обосновывается двумя основными факторами:

- заземлители могут достигать нижележащих слоев земли с низким удельным сопротивлением, что способствует снижению их сопротивления за счет достижения водонасыщенных слоев грунта;
- сезонный коэффициент таких заземлителей при их длине 10 м и выше приблизительно равен 1 [9].

Другим способом увеличения способности удерживать воду в близлежащих к электродам заземлителях, слоях почвы является применение гидролизованного полиакрилонитрила, в том числе в составе смеси.

Гидролизированный полиакрилонитрил (гидрогель) является экологически безопасным. Исследования [9] указывают на то, что замена части грунта в околоэлектродном пространстве данной смесью способна уменьшить сопротивление грунта. Снижение этого показателя объясняется тем, что гидрогель связывает влагу в почве и не дает ей уходить. Вода с гидрогелем не вымывает минеральные вещества из грунта. Исследования доказывают, что введение в смесь углеродистых наполнителей и глины позволяет еще больше снижать сопротивление грунта.

Кроме того, применение данного способа позволяет снизить температуру замерзания грунта, что дает возможность использовать более высокие средние многолетние низшие температуры при определении климатической зоны площадки месторасположения проектируемого электрооборудования [9].

Исследование влияния используемой смеси на основе гидрогеля на коэффициент сезонности позволило определить, что он снижается до 20 % по сравнению с контрольным заземлителем [9].

Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что применение того или иного метода снижения сопротивления ЗУ или удельного сопротивления грунта в области расположения электродов заземления влечет за собой трудности.

В связи с тем, что в Республике Беларусь введен ТКП 427-2022 (33240), где нормированное значение наведенного сопротивления грунта снизилось до 25 В, необходимо выработать наиболее эффективный способ снижения сопротивления ЗУ. В качестве возможного решения сложившейся проблемы нами было предложено использование грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля.

Методика проведения эксперимента

Для проведения лабораторных экспериментальных исследований грунтозамещающей смеси и грунта были построены измерительные ячейки, согласно методике, изложенной в ГОСТ 9.602–2016. Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 1. Для измерений использовались:

источник постоянного тока стабилизированный Union Test HY 3005d;

миллиамперметр Victor класса точности 1.5 с диапазоном 100 и 500 мА;

вольтметр Victor с входным сопротивлением не менее 1 МОм;

ячейка из диэлектрического материала (оргстекло) прямоугольной формы с внутренними размерами: $a = 100$ мм, $b = 45$ мм, $h = 45$ мм.

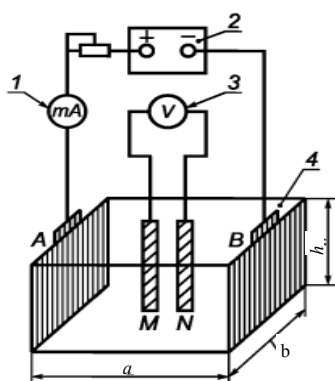


Рис. 1. Схема установки для определения удельного электрического сопротивления грунта и смесей в лабораторных условиях: 1 – миллиамперметр; 2 – источник тока; 3 – вольтметр; 4 – измерительная ячейка размерами a , b , h ; A и B – внешние электроды; M и N – внутренние электроды

Fig. 1. Scheme of the installation for determining the electrical resistivity of soil and mixtures in laboratory conditions: 1 – milliammeter; 2 – current source; 3 – voltmeter; 4 – measuring cell with dimensions a , b , h ; A and B – external electrodes; M and N – internal electrodes

Результаты измерений

Натурные испытания смеси проводились ранее, их результаты представлены в работах [13, 14]. В данной работе исследована зависимость удельного сопротивления смеси от температуры, влажности и содержания гидрогеля. Результаты представлены на рис. 2 [13].

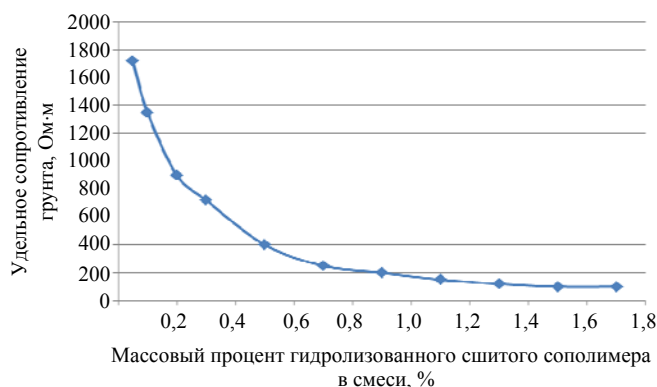


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления грунта от содержания в нем активированного гидрогеля

Fig. 2. Dependence of soil resistivity on the content of activated hydrogel in it

Как видно, при концентрации выше 0,7 % сопротивление меняется незначительно, а при превышении концентрации 1,2 % транспортная функция сшитых сополимеров достигает насыщения, и сопротивление смесей практически не изменяется, что позволяет говорить, о том, что повышение концентрации более 1,3 % не будет столь эффективным [13].

На следующем этапе были проведены исследования зависимости удельного сопротивления от температуры при одинаковой влажности контрольного образца (обычного грунта) и смеси. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

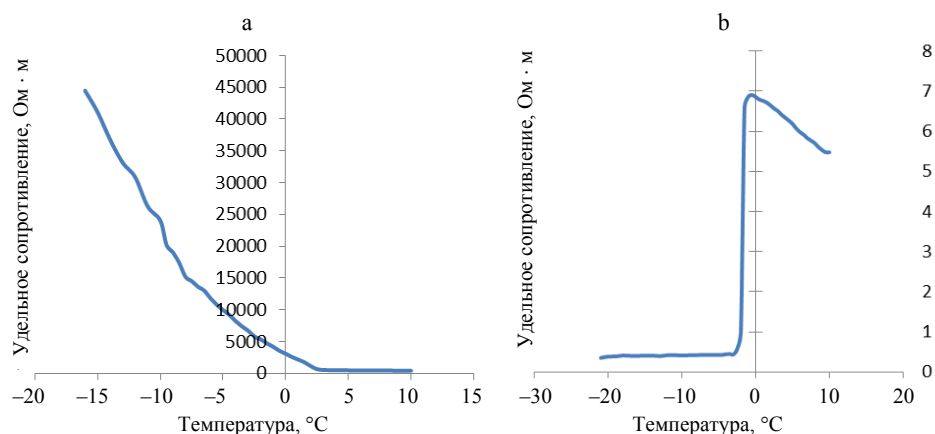


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления грунта (а) и экспериментальной смеси (b) от температуры при влажности 35 %

Fig. 3. Dependence of the resistivity of the soil (a) and the experimental mixture (b) on temperature at moisture of 35 %

При росте температуры происходит скачкообразное увеличение сопротивления, обратное тому, что мы видим для сопротивления грунта (рис. 3а). Это объясняется переходом влаги образца 2 в другое агрегатное состояние и последующим плавным снижением сопротивления до его полной стабилизации в районе 5 Ом·м (рис. 3b).

Полученные данные указывают на то, что происходит снижение влияния температуры на значение удельного сопротивления в околоэлектродном пространстве контура заземления.

В дальнейшем экспериментальная часть включала в себя определение зависимости удельного сопротивления смеси при различной влажности и температуре (рис. 4).

Как видно из графика, температура замерзания составляет от $-3,5$ до -2 °C. Кроме того, мы видим аномальное поведение удельного сопротивления, а именно его уменьшение при замерзании. Такое явление можно объяснить уплотнением проводящих частей графита, содержащегося в смеси. Это позволяет говорить о возможной компенсации сезонных колебаний электрофизических параметров грунта, влияющих на сопротивление заземляющего устройства.

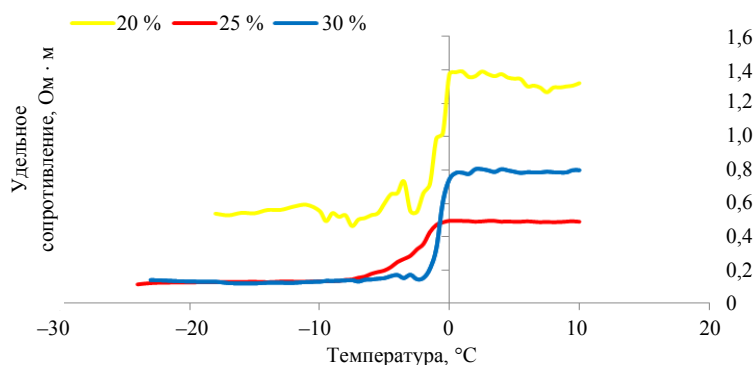


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления смеси от температуры при различной влажности

Fig. 4. Dependences of the mixture specific resistance on temperature at different moisture

Кроме того, проведенные нами исследования дают возможность эмпирически описать снижение сопротивления заземляющего устройства как величину, зависящую от изменения удельного сопротивления грунта:

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_3 \cdot 0,98^{\frac{d_{\text{смеси}}}{d_3}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho_3} \right)^{\frac{1}{3\pi}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{экв}}$ – искомое расчетное удельное сопротивление, Ом · м; ρ_3 – удельное сопротивление грунта, Ом · м; $d_{\text{смеси}}$ – эквивалентный диаметр заземлителя, м; d_3 – диаметр заземлителя, м; $\rho_{\text{смеси}}$ – удельное сопротивление смеси, Ом · м.

Формула (1) получена эмпирически и проверена на образцах с различным содержанием компонентов и, соответственно, удельным сопротивлением.

Сравнивая полученную формулу (1) с представленной в работе [15] для коксовой мелочи, проводя необходимые расчеты, можно увидеть, что формула (1) более точно описывает влияние замены грунта на общее сопротивление заземляющего устройства.

ВЫВОД

В работе получены результаты исследований температурной и концентрационной зависимости удельного электрического сопротивления. Оно не согласуется с известной зависимостью, что расширяет возможность применения этой смеси в районах с низкой среднегодовой температурой.

Проведенные исследования показали снижение сезонной зависимости сопротивления контура заземления [6, 9, 13], что позволяет говорить о снижении сопротивления контура за счет снижения удельного сопротив-

ления грунта $\rho_{уд}$, снижении сезонности. Вкупе с обратной зависимостью от температуры делает их интересными с точки зрения модификации грунтов с удельным сопротивлением больше 200 Ом·м.

Предложенная эмпирическая формула хорошо описывает влияние удельного сопротивления и его объема в месте монтажа на изменение удельного сопротивления грунта.

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что применение грунтозамещающей смеси при монтаже заземляющих устройств является обоснованным, так как это ведет к уменьшению удельного сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веденеева, Л. М. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств / Л. М. Веденеева, А. В. Чудинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16, № 1. С. 89–100.
2. IEEE Std 142–2007. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. Approved 7 June 2007. 225 p. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2007.4396963>.
3. Драко, М. А. Коррозия заземлителей электроустановок / М. А. Драко // Энергетическая стратегия. 2019. № 6. С. 44–48.
4. Веденеева, Л. М. Исследование влияния влажности и пористости грунтов на величину их проводимости / Л. М. Веденеева, А. В. Чудинов // Вестник ПНИПУ. Безопасность и управление рисками. 2016. № 5. С. 119–130.
5. Кучеренко, Д. Е. Влияние особенностей грунта на расчет и проектирование ЗУ / Д. Е. Кучеренко, Д. Н. Грищенко // COLLOQUIUM-JOURNAL. 2018. № 12–6. С. 84–90.
6. Барайшук, С. М. Снижение сезонных колебаний сопротивления растеканию тока заземляющих устройств применением смесей для стабилизации влажности грунта / С. М. Барайшук, И. А. Павлович, М. И. Кахоцкий // Эпоха Науки. 2020. № 24. С. 87–93.
7. Grounding System Design Method in High Soil Resistivity Regions / Zhuang Chijie [et al.] // Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering. 2008. Vol. 34, No 5. 893–897.
8. The influence of Seasonal Soil Moisture on the Behavior of Soil Resistivity and Power Distribution Grounding Systems / L. Coelho Vilson [et al.] // Electric Power Systems Research. 2015. Vol. 118. P. 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027>.
9. Драко, М. А. О разработке смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта / М. А. Драко, С. М. Барайшук, И. А. Павлович // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92>.
10. Tung, C. C. Performance of Electrical Grounding System in Soil at Low Moisture Content Condition at Various Compression Levels / C.C. Tung, S. C. Lim // Journal of Engineering Science and Technology. 2017. Vol. 12, Special Iss. 1. P. 27–47.
11. Грибанов, А. Н. Бипрон – заземление электроустановок / А. Н. Грибанов // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 4. С. 72–75.
12. Kirkpatrick, E. L. The conflict Between Copper Grounding Systems and Cathodic Protection Systems [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.elkeng.com/pdfs/6-The-Conflict-Between-Copper-GroundingCP122001.pdf>.

13. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажностью добавками / С. М. Барайшук [и др.] // Агропанорама. 2021. № 5 (147). С. 28–33.
14. Павлович, И. А. Температурная зависимость удельного сопротивления грунтозамещающих композиционных смесей для оптимизации заземления / И. А. Павлович, С. М. Барайшук, М. Х. Муродов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 21–22 декабря 2021 г. Минск: БГАТУ, 2021. С. 230–232.
15. Профессиональный центр знаний zandz.com о молниезащите и заземлении [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zandz.com/ru/>. Дата доступа: 24.10.2022.
16. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339-2011(02230). Введ. 23.08.2011. Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2011. 593 с.
17. Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций: СН 4.04.03-2020. Введ. 21.04.2021. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. 161 с.

Поступила 04.10.2022 Подписана в печать 13.12.2022 Опубликовано онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Vedeneeva L. M., Chudinov A. V. (2017) Investigation of the Influence of the Basic Properties of Soil on the Resistance of Grounding Devices. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i Gornoe Delo = Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 16 (1), 89–100 (in Russian).
2. IEEE Std 142–2007. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. Approved 7 June 2007. 225. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2007.4396963>.
3. Drako M. A. (2019) Corrosion of Grounding Conductors of Electrical Installations. *Energeticheskaya Strategiya* [Power Strategy], (6), 44–48 (in Russian).
4. Vedeneeva L. M., Chudinov A. V. (2016) Investigation of the Influence of Soil Moisture and Porosity on the Value of Their Conductivity. *Vestnik PNIPU. Bezopasnost' i Upravlenie Riskami* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Safety and Risk Management], (5), 119–130 (in Russian).
5. Kucherenko D. E., Grishchenko D. N. (2018) The Influence of Soil Features on the Calculation and Design of the Storage Device. *Colloquium-Journal*, (12–6) (23), 84–90 (in Russian).
6. Baraishuk S. M., Pavlovich I. A., Kakhotsky M. I. (2020) Reduction of Seasonal Fluctuations in the Resistance to the Spreading of the Current of Grounding Devices Using Mixtures to Stabilize Soil Moisture. *Epokha Nauki* [The Age of Science], (24), 87–93 (in Russian).
7. Zhuang Chijie, Zeng Rong, Zhang Bo, HE Jin-Liang (2008) Grounding System Design Method in High Soil Resistivity Regions. *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*, 34 (5), 893–897 (in Chinese).
8. Vilson L. C., Piantini A., Almaguer H. A. D., Coelho R. A., Boaventura W. C., Paulino J. O. S. (2015) The Influence of Seasonal soil Moisture on the Behavior of Soil Resistivity and Power Distribution Grounding Systems. *Electric Power Systems Research*, 118, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027>.
9. Drako M.A., Baraishuk S. M., Pavlovich I. A. (2021) Compound Mixtures Based on Hydrolyzed Polyacrylonitrile Reducing Soil Electrical Resistivity. *Power Engineering: Research*,

- Equipment, Technology*, 23 (1), 80–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92> (in Russian).
10. Tung C. C., Lim S. C. (2017) Performance of electrical Grounding System in Soil at Low Moisture Content Condition at Various Compression Levels. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12 (Special Issue), 27–47.
 11. Griбанов А. Н. (2016) Bipron: Grounding of Electrical Installations. *Ekspozitsiya Neft' Gaz = Exposition Oil & Gas*, (4), 72–75 (in Russian).
 12. Kirkpatrick E. L. *The Conflict Between Copper Grounding Systems and Cathodic Protection Systems*. Available at: <https://www.elkeng.com/pdfs/6-The-Conflict-Between-Copper-GroundingCP122001.pdf>.
 13. Barayshuk S. M., Pavlovich I. A., Murodov M. H., Abdullaev H., Skripko A. N. (2021) Reducing the Resistance of Grounding Devices by Using Soil Treatment with Moisture-Stabilizing Additives that Are Not Aggressive to the Grounding Material. *Agropanorama*, (5), 28–33 (in Russian).
 14. Pavlovich I. A., Barayshuk S. M., Murodov M. H. (2021) Temperature Dependence of the Resistivity of Soil-Substituting Composite Mixtures for the Optimization of Grounding. *Energosbereazhenie – Vazhneishie Uslovia Innovatsionnogo Razvitiya APK: Materialy Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii, Minsk, 21–22 Dekabrya 2021 g.* [Energy Saving as the Most Important Condition for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, December 21–22, 2021] Minsk, BGATU, 230–232 (in Russian).
 15. Professional Knowledge Center Zandz. *Com on Lightning Protection and Grounding*. Available at: <https://zandz.com/ru/> (accessed 24 October 2022) (in Russian).
 16. ТКР 339-2011(02230) *Electrical Installations for Voltage up to 750 kV. Power Transmission Lines, Overhead and Current Lines, Distribution and Transformer Substations, Electric Power and Battery Installations, Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Rules and Protective Measures of Electrical safety. Electricity Accounting. Norms of Acceptance Tests*. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2011. 593 (in Russian).
 17. SN 4.04.03-2020 *Lightning Protection of Buildings, Structures and Utilities*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2020. 161 (in Russian).

Received: 4 October 2022

Accepted: 13 December 2022

Published online: 31 July 2023

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-333-343>

УДК 621.311.2

Ввод дополнительного выключателя в блок генератор-трансформатор для энергосбережения в схемах открытых распределительных устройств электростанций

А. С. Барукин¹⁾, М. Я. Клепель¹⁾, А. Ж. Динмуханбетова¹⁾, Д. А. Амирбек¹⁾

¹⁾Торайгыров университет (Павлодар, Республика Казахстан)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Обосновывается необходимость отыскания новых путей энергосбережения на открытых распределительных устройствах электростанций. Предлагается для повышения эффективности энергосбережения вводить дополнительный выключатель между трансформатором блока и его двумя выключателями со стороны высшего напряжения. Целесообразность такого ввода доказывается на основе сравнения результатов расчетов недоотпуска электроэнергии (НЭ) по таблично-логическому методу (Ю. Б. Гук) полученных схем и традиционных. Для расчетов исследуются режимы, возникшие в связи с изменившейся главной схемой электростанции. При этом даются формулы, по которым рассчитываются уменьшения НЭ, ущерба от него при реконструкции и затрат при сооружении электростанции (считается, что издержки во всех вариантах одинаковы). Используются статистические данные России и спрогнозированная нами частота $\lambda_{эв}$ отказов элегазового выключателя напряжением 750 кВ. Рассматривается использование в качестве вводимого выключателя элегазового с заменой и без замены остальных выключателей на элегазовые. Представляется таблица с результатами расчетов НЭ, ущерба и затрат при предлагаемом вводе, где определяется, насколько ввод выключателя изменяет их для 18 кольцевых схем и 17 схем «3/2» и «4/3» открытых распределительных устройств напряжением 330–750 кВ на КЭС, АЭС и ГЭС. Показывается, что наличие генераторного выключателя в блоках позволяет в несколько раз уменьшить эти показатели эффективности энергосбережения. Предлагается способ определения частоты отказов гипотетического выключателя, способного при традиционной замене принести такой же эффект, как вводимый элегазовый выключатель. Дается пример определения этой частоты. Приводятся результаты расчетного уменьшения НЭ, ущерба и затрат при замене воздушного выключателя на элегазовый.

Ключевые слова: трансформатор блока, дополнительный выключатель, генераторный выключатель, частота отказов, формулы, энергосбережение

Для цитирования: Ввод дополнительного выключателя в блок генератор-трансформатор для энергосбережения в схемах открытых распределительных устройств электростанций / А. С. Барукин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 333–343. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-333-343>

Адрес для переписки

Барукин Александр Сергеевич
Торайгыров университет
ул. Ломова, 64,
140008, г. Павлодар, Республика Казахстан
Тел.: +7 778 288-79-15
alexbarukin@mail.ru

Address for correspondence

Barukin Alexandr S.
Toraighyrov University
64, Lomov str.,
140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan
Tel.: +7 778 288-79-15
alexbarukin@mail.ru

Introduction of an Auxiliary Breaker into the Generator-Transformer Block for Energy Saving in Open Switchgear Circuits of Power Plants

A. S. Barukin¹⁾, M. Ya. Kletsel¹⁾, A. Zh. Dinmukhanbetova¹⁾, D. A. Amirbek¹⁾

¹⁾Toraighyrov University (Pavlodar, Republic of Kazakhstan)

Abstract. A need in finding of new ways of energy saving at open switchgears of power plants is substantiated. In order to increase energy saving efficiency, an auxiliary breaker is suggested to be inserted between a transformer of a block and its two high-voltage circuit breakers. The reasonability of such an insertion is proved on the basis of comparing of calculations results of under-discharge of electricity (UE) by the tabular-logical method (Yu. B. Guk) of the obtained schemes and of the traditional ones. For the calculations, the conditions that arose due to the change in the main circuit of a power plant are studied. Also, equations are given for calculation of a decrease in UE, damage due to it during reconstruction, and costs for the construction of a power plant (the costs are assumed to be the same in all options). Russian statistical data and the predicted failure rate λ_{EV} of a 750 kV SF6 circuit breaker are used. An option of the introduction of an SF6 circuit breaker with and without replacement of other circuit breakers with SF6 circuit breakers is considered. The results of calculations of UE, damage, and costs for the introduction suggested are tabulated, where changes in them due to the introduction of the circuit breaker are estimated for 18 ring circuits and 17 “3/2” and “4/3” circuits of 330–750 kV switchgears at condensation, nuclear, and hydroelectric power plants. It is demonstrated that the presence of a generator breaker in the blocks makes it possible to reduce these energy-saving efficiency indicators several times. A technique for determining the failure rate of a hypothetical circuit breaker, which, in the case of traditional replacement, is capable of producing the same effect as an SF6 circuit breaker inserted is proposed. An example of determining this frequency is given. Results of the calculated reduction of UE, damage and costs for the case of an air circuit breaker having been substituted to an SF6 circuit breaker are presented.

Keywords: block transformer, auxiliary breaker, generator circuit breaker, failure rate, equations, energy saving

For citation: Barukin A. S., Kletsel M. Ya., Dinmukhanbetova A. Zh., Amirbek D. A. (2023) Introduction of an Auxiliary Breaker into the Generator-Transformer Block for Energy Saving in Open Switchgear Circuits of Power Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 333–343. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-333-343> (in Russian)

Введение

Уменьшение недоотпуска электроэнергии на открытых распределительных устройствах (ОРУ) электростанций решается в основном путем замены воздушных выключателей (ВВ) на более надежные – элегазовые (ЭВ). Что дает замена, на сколько процентов (хотя бы ориентировочно) она уменьшает недоотпуск электроэнергии на электростанциях, нам в публикациях журналов, индексируемых в Scopus и Web of Science, и публикациях известных изданий России обнаружить не удалось. Недоотпуск зависит не только от частоты отказов выключателя, но и от частоты отказов элементов схем ОРУ, причем, согласно [1], существенное влияние на показатели структурной надежности схем оказывают количество и мощность блоков генератор-трансформатор, а в [2] показано, что на эти показатели

могут влиять и шины. Можно ли без математического обоснования считать замену выключателей наиболее действенным путем уменьшения недоотпуска электроэнергии в ОРУ электростанций? Может, для дальнейшего уменьшения недоотпуска стоит обратить особое внимание на надежность блоков и линий? Не стоит ли попытаться создать, например, новые схемы ОРУ, более надежные, чем традиционные, не заменяя выключатели? В статье делается попытка в той или иной мере ответить на поднятые вопросы. При этом используется таблично-логический метод расчета недоотпуска электроэнергии W [3, 4] из-за ненадежности схемы ОРУ. Уменьшение недоотпуска $\Delta W\%$ в ОРУ при замене ВВ на ЭВ и ущерба $\Delta Y\%$ от него при реконструкции, а также уменьшение затрат $\Delta Z\%$ при сооружении электростанции определяются по нижеприведенным формулам.

Методика расчета W из-за ненадежности схем открытых распределительных устройств (Ю. Б. Гук)

Составляется таблица исходных данных и матрица логических связей отказов и определяется частота k -й аварии при времени восстановления τ_i и j -го режима q_j ($j = 0, 1, \dots, m$)

$$\Lambda(k) = \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_j \lambda_i L(j, i, k), \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – элементы рассматриваемой схемы; λ_i – частота отказов i -го элемента.

Код аварии k записывается на пересечении столбца j и строки i матрицы связей отказов i -х элементов и j -х режимов. Если код k находится на пересечении, то конъюнкция $L(j, i, k) = 1$, если нет, то $L(j, i, k) = 0$. Затем определяются времена восстановления схемы с кодами $k_{в.р.}$ и $k_{о.п.}$ длительных и кратковременных аварий при ремонтах и оперативных переключениях [3–5]

$$\tau(k_{в.р.}) = \left[\sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_j \lambda_i \tau(j, i, k_{в.р.}) \right] / \Lambda(k_{в.р.}) \text{ и } \tau(k_{о.п.}) = 5,71 \cdot 10^{-5} \text{ год.} \quad (2)$$

Годовой недоотпуск электроэнергии при теряемых мощностях $\Delta P(k_{о.п.})$ и $\Delta P(k_{в.р.})$

$$\begin{aligned} W = & 8760 \sum_k \Lambda(k_{о.п.}) \Delta P(k_{о.п.}) \tau(k_{о.п.}) + 8760 \sum_k \Lambda(k_{в.р.}) \Delta P(k_{в.р.}) \tau(k_{в.р.}) + \\ & + 8760 \sum_k \Lambda(k_{о.п.} / k_{в.р.}) \left\{ \Delta P(k_{о.п.}) \tau(k_{о.п.}) + \Delta P(k_{в.р.}) [\tau(k_{в.р.}) - \tau(k_{о.п.})] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Формулы для расчета $\Delta W\%$, $\Delta Y\%$ и $\Delta Z\%$

Их особенности: учет стоимости ЭВ при вычислении разницы ущербов от недоотпуска в схемах ОРУ с ЭВ и ВВ и пренебрежение отличием из-

держек при вычислении разностей затрат. Последнее дает запас в результатах расчетов $\Delta 3\%$, так как в схемах с ЭВ издержки меньше [6]. Формулы записываются следующим образом:

$$\Delta W \% = \frac{W_{\text{ВВ}} - W_{\text{ЭВ}}}{W_{\text{ВВ}}} \cdot 100 \%; \Delta Y \% = \frac{Y_{\text{ВВ}} - Y_{\text{ЭВ}} - nC_{\text{ЭВ}}}{Y_{\text{ВВ}}} \cdot 100 \%; \quad (4)$$

$$\Delta 3 \% = \frac{3_{\text{ВВ}} - 3_{\text{ЭВ}}}{3_{\text{ВВ}}} \cdot 100 \% = \frac{(Y_{\text{ВВ}} - Y_{\text{ЭВ}}) + 0,204n(C_{\text{ВВ}} - C_{\text{ЭВ}})}{0,204(K_{\text{БЛ}} + K_{\text{ЛЭП}} + nC_{\text{ВВ}}) + Y_{\text{ВВ}}} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $W_{\text{ВВ}}$, $W_{\text{ЭВ}}$ – суммарный аварийный годовой недоотпуск электроэнергии на ЭС с ВВ и ЭВ, кВт·ч/год; n – количество выключателей в ОРУ, шт.; $C_{\text{ВВ}}$ и $C_{\text{ЭВ}}$ – стоимость ячейки воздушного и элегазового выключателей, дол. США; $Y_{\text{ВВ}}$ и $Y_{\text{ЭВ}}$ – ущерб из-за ненадежности элементов схем ОРУ с ВВ и ЭВ, $Y = y_0 W$, дол. США; y_0 – удельный ущерб, согласно [7], $y_0 = 3$ долл./кВт·ч; $3_{\text{ВВ}}$ и $3_{\text{ЭВ}}$ – затраты на сооружение ЭС с установкой ВВ и ЭВ, дол. США. Причем

$$\begin{aligned} 3_{\text{ВВ}} &= 0,204(K_{\text{БЛ}} + K_{\text{ЛЭП}} + nC_{\text{ВВ}}) + Y_{\text{ВВ}}; \\ 3_{\text{ЭВ}} &= 0,204(K_{\text{БЛ}} + K_{\text{ЛЭП}} + nC_{\text{ЭВ}}) + Y_{\text{ЭВ}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где 0,204 – учитывает эффективность капиталовложений (выражения в скобках) на сооружение ЭС и отчисления; $K_{\text{БЛ}}$ и $K_{\text{ЛЭП}}$ – стоимость мощности блоков и линий электропередач.

Исходные данные

Взяты из [8, 9], так как в Казахстане все элементы схем ОРУ в основном российские. Для КЭС частота $\lambda_{\text{БЛ}}$ (год^{-1}) отказов блока, длительность τ (10^{-3} год) восстановления и вероятность $q_{\text{пл}}$ (10^{-3} о.е.) планового ремонта при мощности 300 (500; более 500) МВт равны 6 (8; 10), 10 (11; 12,5) и 70 (91; 135) соответственно. Аналогичные показатели для линий электропередач напряжением 330 (500; 750) кВ равны 2,8 (4,8; 4), 1,4 (2; 1,5) и 10 (12; 14). Для ВВ в цепях линий они составляют 0,2 (0,2; 0,3), 7 (10,3; 14) и 25 (31; 35), а для ЭВ напряжением 330 (500) кВ – 0,13 (0,14), 8 (5,5) и 3 (8). При установке в других цепях частота $\lambda_{\text{ВВ}}$ отказов ВВ напряжением 330 (500; 750) кВ – 0,07 (0,08; 0,12), а $\lambda_{\text{ЭВ}}$ напряжением 330 (500) кВ – 0,05 (0,06) (согласуется с [10]). Частота статистических отказов элегазовых выключателей 750 кВ, насколько нам известно, нигде не приводится. Поэтому, используя данные [8] по частоте $\lambda_{\text{ЭВ}}$ отказов ЭВ для напряжений 110–500 кВ, нами получена аппроксимирующая функция $\lambda_{\text{ЭВ}} = f(U)$ (достоверность по Фишеру 76 %), из которой при установке в цепях линий $\lambda_{\text{ЭВ}}^{750 \text{ кВ}} = 0,2 \text{ год}^{-1}$ (в других цепях $\lambda_{\text{ЭВ}}^{750 \text{ кВ}} = 0,08 \text{ год}^{-1}$).

Аналогичным образом спрогнозированы длительность восстановления $\tau = 7 \cdot 10^{-3}$ год и вероятность планового ремонта $q_{пл} = 11 \cdot 10^{-3}$ о.е. Показатели надежности всех элементов станций типа АЭС и ГЭС также берутся из [8, 9]. Отметим, что в дальнейшем для упрощения изложения будем пользоваться имеющим место соотношением $\lambda_{ЭВ} = (0,65 \div 0,7) \lambda_{ВВ}$.

Рассматриваются используемые на электростанциях типа КЭС, АЭС и ГЭС следующие традиционные схемы ОРУ напряжением 330, 500, 750 кВ с блоками генератор-трансформатор (БЛ) мощностью 300–1200 МВт с генераторными выключателями и высоковольтными линиями (ВЛ) средней длины: четырехугольник – с 2 БЛ и 2 ВЛ; пятиугольник – с 2 БЛ и 3 ВЛ; шестиугольник – с 3 БЛ и 3 ВЛ; три выключателя на два присоединения – 3/2 (схема 1) – с 3 БЛ, 4 ВЛ и автотрансформатором связи (АТ) [11]; 3/2 (схема 2) – с 6 БЛ, 7 ВЛ и АТ [12]; четыре выключателя на три присоединения – 4/3 (схема 1) – с 3 БЛ, 5 ВЛ и АТ [13]; 4/3 (схема 2) – с 4 БЛ, 6 ВЛ и 2 АТ [12].

Влияние генераторного выключателя на энергосбережение в схемах открытых распределительных устройств

Наличие генераторного выключателя в блоке генератор-трансформатор дает ряд общеизвестных преимуществ перед вариантом его отсутствия [14]. Поэтому по Нормам технологического проектирования на АЭС он устанавливается всегда [9], а на ГЭС и КЭС должен устанавливаться, но в ряде случаев по тем или иным причинам не устанавливается.

Как показали наши расчеты, его роль на ГЭС и КЭС явно недооценивается. Она определялась нами по недоотпуску электроэнергии W , ущербу Y и затратам Z на сооружение электростанции. После вычисления недоотпуска методом Ю. Б. Гука (по (1)–(3)), при наличии и отсутствии генераторных выключателей, по (4) и (5) рассчитываются $\Delta W\%$, $\Delta Y\%$ и $\Delta Z\%$. При отсутствии частота $\lambda_{БЛ}^{\Sigma}$ отказов блока указана выше, а при наличии [5] – $\lambda_{БЛ}^{\Sigma} = 0,1 \lambda_{БЛ}^{\Sigma}$.

При расчете $\Delta Y\%$ в (4) в числителе не используется вычитаемое $nC_{ЭВ}$, а вычитаемое $Y_{ЭВ}$ заменяется на $Y'_{ВВ}$, где $Y'_{ВВ}$ – ущерб из-за ненадежности элементов схем ОРУ с ВВ при наличии генераторного выключателя в блоках. Аналогично при определении $\Delta Z\%$ по (4) выражение в числителе заменяется на $(Y_{ВВ} - Y'_{ВВ})$. Анализ полученных результатов показывает, что для схем ГЭС (КЭС) наличие генераторного выключателя в блоках дает уменьшения $\Delta Y\% = 78 \div 89\%$ ($86 \div 89\%$) и $\Delta Z\% = 17 \div 19\%$ ($82 \div 85\%$). Меньший диапазон $\Delta Z\%$ для ГЭС объясняется тем, что их блоки генератор-трансформатор в несколько раз надежнее блоков КЭС.

Средняя стоимость сооружения 1 МВт считалась на КЭС (ГЭС; АЭС) 0,55 (4; 4,7) млн дол. США, а 1 км линии электропередач на 330 (500; 750) кВ – 34 (47; 82) тыс. дол. США [15]. Стоимость ВВ (ЭВ) [15] на 330 кВ и 500 кВ 351 (370) и 644 (480) тыс. дол. США, а на 750 кВ – 1,3 (1,2) млн дол. США.

Ожидаемые $\Delta W\%$, $\Delta U\%$, $\Delta Z\%$ в результате замены воздушных выключателей на элегазовые с $\lambda_{ЭВ} = (0,65 \div 0,7)\lambda_{ВВ}$

Рассчитываются, как и в предыдущем случае. Здесь и далее принималось, что все блоки имеют генераторные выключатели. Результаты представлены в табл. 1, где видно, что замена ВВ на ЭВ эффективна (если считать $\Delta W\% > 5\%$) на всех ГЭС ($\Delta W\% = 9 \div 44\%$), АЭС ($\Delta W\% = 5 \div 9\%$) и на 11 КЭС ($\Delta W\% = 6 \div 9\%$) из 20.

По (4) уменьшение ущерба $\Delta U\%$ от недоотпуска электроэнергии при реконструкции составит $1,3 \div 9\%$ для КЭС и АЭС. Для 10 ГЭС из 11 $\Delta U\% = 0,4 \div 31\%$. В одной схеме ущерб при замене ВВ на ЭВ, наоборот, увеличивается на 7%. При сооружении новых электростанций использование ЭВ вместо ВВ может снизить приведенные затраты Z (определяются по (5)) для всех рассмотренных схем на КЭС и АЭС на $1,2 \div 7,2\%$, а на ГЭС на $0,4 \div 2,4\%$.

Схемы открытых распределительных устройств с дополнительными выключателями в блоках

Предлагаемые схемы, например, по патенту [16], отличаются от традиционных дополнительным выключателем, введенным между каждым блоком генератор-трансформатор и его выключателями со стороны высшего напряжения. На рис. 1 дан пример такого ввода для схемы шестиугольника.

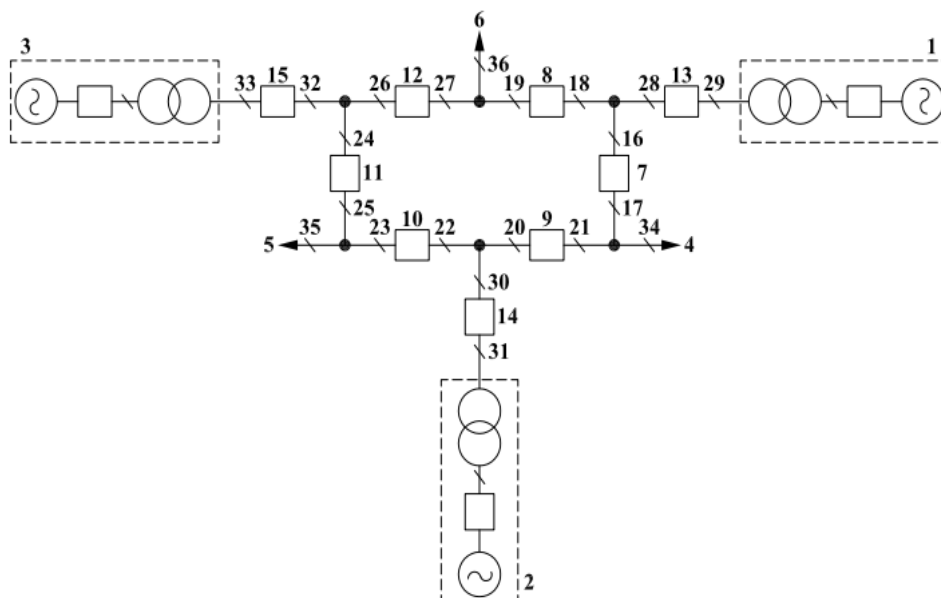


Рис. 1. Схема открытого распределительного устройства шестиугольника с дополнительным выключателем между трансформатором блока и его двумя выключателями

Fig. 1. Hexagon switchgear diagram with an auxiliary breaker between a block transformer and its two breakers

Как и в традиционной, возможны следующие расчетные режимы работы схемы: нормальный режим, без ремонтов; аварийный ремонт блока 1 (2; 3); плановый ремонт блока 1 (2; 3), совмещаемый с выключателями 7, 8 и 13 (9, 10 и 14; 11, 12 и 15); аварийный ремонт линии 4 (5; 6); плановый ремонт линии 4 (5; 6); аварийный ремонт выключателей 7 (8–12) и 13 (14; 15).

Рассмотрим особенности работы схемы (рис. 1).

1. При коротком замыкании (КЗ) в блоке 1 от действия его релейной защиты (РЗ) отключается выключатель 13, после чего теряется мощность блока $\Delta P_{\text{БЛ}}$ на время t_1 его аварийного ремонта и пуска. Персонал отключает разъединители 28 и 29. При КЗ в блоках 2 и 3 все аналогично. При отклазе выключателя 13 от устройства резервирования отказов выключателя (УРОВ) отключаются выключатели 7 и 8. Все линии и неповрежденные блоки остаются в работе.

2. При отказе типа «КЗ в обе стороны» выключателя 13 (7) от действия РЗ блока 1 (линии 4 и блока 1) отключаются выключатели 7 и 8 (8, 9 и 13). После отсоединения выключателя 13 (7) от схемы разъединителями 28 и 29 (16 и 17) (для ремонта), выключатели 7 и 8 (8, 9 и 13) включаются персоналом. Блок 1 теряется на время t_2 ремонта выключателя (ВЛ 4 подключается к схеме, и через время t_3 осуществляется пуск блока из состояния горячего резерва). При отказах типа «КЗ в обе стороны» остальных выключателей схемы все действия аналогичны.

3. При устойчивом КЗ на ВЛ 4 она отключается выключателями 7 и 9 (от РЗ) и выводится в аварийный ремонт разъединителем 34. Разъединителями 16, 17 и 21 выключатели 7 и 9 отсоединяются от схемы, потери мощности нет. Если КЗ на ВЛ 4 неустойчивое и выключатель 7 отказывает во включении при АПВ, то от АПВ включается только выключатель 9. Потери мощности нет. Если при КЗ на ВЛ 4 выключатель 7 отказывает в отключении, то УРОВ отключает выключатели 8, 9 и 13. Блок теряется на время t_4 ремонта выключателя 7. При КЗ на линиях 4, 5, 6 или при КЗ в блоках 1, 2, 3, совпадающих с отказами в отключении выключателей 7–15, действия РЗ и персонала аналогичны. При ремонте одного из элементов схемы все операции подобны рассмотренным.

Оценка целесообразности использования предлагаемых схем

Анализ результатов расчетов, представленных в табл. 1, показал:

1. Ввод ЭВ в схеме ОРУ с ВВ может понизить недоотпуск на КЭС и АЭС на $\Delta W\% = 2 \div 11\%$, причем для 13 из 20 КЭС и 2 из 4 АЭС $\Delta W\% > 5\%$. Это позволит уменьшить ущерб от недоотпуска при реконструкции ЭС и затраты при сооружении на $1 \div 10\%$ и $1 \div 8\%$ соответственно. На ГЭС такой ввод нецелесообразен, так как недоотпуск увеличивается. В табл. 1 это отражается знаком «—» перед цифрой.

Таблица 1

Результаты расчетов

Calculation results

U, кВ	$P_{\text{БЛ}} \times 10^2 \text{ МВт}$	Тип станции	Недоотпуск $W, \times 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$				Замена ВВ на ЭВ (ЭВ вводится к ВВ; ЭВ вводится к ЭВ)		
			при $0,1\lambda_{\text{БЛ}}^{\Sigma} (\lambda_{\text{БЛ}}^{\Sigma})$		при вводе ЭВ				
			ВВ	ЭВ	к ВВ	к ЭВ	$\Delta W\%$	$\Delta U\%$	$\Delta 3\%$
Четырехугольник (2 БЛ, 2 ВЛ)									
750	10	АЭС	199 (–)	184 (–)	187	177	8 (6; 4)	7 (6; 3)	2 (1; 1)
	8	КЭС	197 (1567)	181 (1498)	180	171	8 (9; 6)	7 (8; 5)	6 (6; 4)
500	8	КЭС	211 (1470)	195 (1432)	199	187	8 (6; 4)	7 (6; 4)	6 (4; 3)
	5	ГЭС	19 (85)	15 (77)	20	17	21 (–5; –13)	18 (–7; –16)	1 (0; –1)
	3	КЭС	38 (332)	36 (323)	36	35	5 (5; 3)	4 (4; 2)	3 (3; 2)
330	3	ГЭС	11 (49)	10 (47)	12	11	9 (–9; –10)	4 (–11; –13)	1 (–1; –1)
Пятиугольник (2 БЛ, 3 ВЛ)									
750	12	КЭС	307 (2456)	281 (2348)	280	266	8 (9; 5)	8 (9; 5)	6 (7; 4)
	8	КЭС	195 (1566)	179 (1496)	178	169	8 (9; 6)	7 (8; 5)	6 (6; 4)
500	10	КЭС	248 (1906)	234 (1860)	233	223	6 (6; 5)	5 (6; 5)	4 (5; 3)
	8	КЭС	183 (1499)	175 (1465)	171	167	4 (7; 5)	4 (6; 4)	3 (5; 3)
	5	КЭС	91 (786)	86 (765)	85	83	5 (7; 3)	5 (6; 3)	4 (4; 2)
330	3	КЭС	37 (331)	35 (320)	35	34	5 (5; 3)	4 (5; 2)	3 (3; 2)
Шестиугольник (3 БЛ, 3 ВЛ)									
750	12	КЭС	477 (3914)	432 (3606)	428	404	9 (10; 6)	9 (10; 6)	7 (8; 5)
	8	КЭС	302 (2493)	274 (2297)	270	256	9 (11; 7)	8 (10; 6)	7 (8; 5)
500	8	КЭС	302 (2249)	281 (2172)	281	267	7 (7; 5)	7 (7; 5)	5 (5; 4)
	5	КЭС	139 (1210)	132 (1169)	129	125	5 (7; 5)	4 (7; 5)	4 (5; 4)
	3	КЭС	56 (506)	53 (488)	53	51	5 (5; 4)	4 (4; 3)	3 (3; 2)
330	3	КЭС	59 (503)	56 (483)	55	54	5 (7; 4)	4 (6; 3)	3 (4; 2)
3/2 (схема 1) (3 БЛ, 4 ВЛ, АТ)									
750	12	КЭС	445 (3647)	409 (3489)	421	397	8 (5; 3)	7 (5; 3)	6 (4; 2)
	10	АЭС	295 (–)	269 (–)	282	262	9 (4; 3)	7 (4; 2)	2 (1; 1)
	8	ГЭС	39 (198)	22 (169)	47	31	44 (–21; –41)	31 (–24; –47)	2 (–1; –1)
500	8	КЭС	292 (2128)	274 (2076)	281	267	6 (4; 3)	5 (4; 2)	5 (3; 2)
	5	ГЭС	21 (114)	15 (106)	24	18	29 (–14; –20)	19 (–17; –23)	1 (–1; –1)
	3	КЭС	57 (484)	52 (471)	56	52	9 (2; 0)	5 (1; –1)	5 (1; 0)
3/2 (схема 2) (6 БЛ, 7 ВЛ, АТ)									
750	8	ГЭС	70 (388)	43 (336)	88	61	39 (–26; –42)	25 (–29; –48)	2 (–1; –1)
330	3	ГЭС	20 (127)	17 (126)	23	21	15 (–15; –24)	0 (–19; –28)	1 (–1; –1)
4/3 (схема 1) (3 БЛ, 5 ВЛ, АТ)									
750	10	АЭС	298 (–)	273 (–)	279	262	8 (6; 4)	7 (6; 4)	2 (1; 1)
	8	ГЭС	36 (202)	22 (171)	45	30	39 (–25; –36)	25 (–29; –42)	2 (–1; –1)
500	10	АЭС	284 (–)	269 (–)	270	259	5 (5; 4)	5 (5; 4)	1 (1; 1)
	8	КЭС	269 (2268)	257 (2209)	254	247	4 (6; 4)	4 (5; 4)	3 (4; 3)
	5	ГЭС	16 (111)	12 (104)	19	15	25 (–19; –25)	13 (–22; –29)	1 (–1; –1)
330	3	ГЭС	8 (63)	7 (62)	10	9	13 (–25; –29)	–7 (–30; –34)	0 (–1; –1)
4/3 (схема 2) (4 БЛ, 6 ВЛ, 2 АТ)									
500	5	ГЭС	21 (149)	16 (139)	24	20	24 (–14; –25)	11 (–17; –29)	1 (–1; –1)
330	8	ГЭС	32 (230)	27 (224)	38	33	16 (–19; –22)	9 (–20; –24)	1 (–1; –1)
	3	КЭС	72 (657)	69 (637)	69	67	4 (4; 3)	1 (3; 2)	2 (2; 2)

2. Ввод ЭВ в схеме ОРУ с ЭВ может понизить недоотпуск на КЭС и АЭС на $\Delta W\% = 1 \div 7\%$. При этом $\Delta Y\% = 1 \div 6\%$ (кроме одной схемы КЭС – в ней ущерб увеличивается на 0,3 %), а $\Delta Z\% = 0,3 \div 5\%$. Отметим, что при рассмотренной в предыдущем разделе замене ВВ на ЭВ благодаря такой установке все схемы КЭС становятся эффективными ($\Delta W\% > 5\%$), в то время как на ГЭС это даже вредно (в табл. 1 перед цифрами знак «–»).

3. Такой же эффект, как от ввода ЭВ, можно получить, если разработать выключатели с более низкой частотой отказов λ_{PB} и установить их вместо ЭВ в традиционных схемах. Чтобы определить, какой должна быть частота λ_{PB} , для каждой из рассмотренных схем необходимо построить зависимость недоотпуска W от снижения (в о. е.) частоты λ_{PB} по отношению к частоте $\lambda_{ЭВ}$ отказов ЭВ. Для ее построения определяются значения W при $\lambda_{PB} = \lambda_{ЭВ} (0,8\lambda_{ЭВ}, 0,6\lambda_{ЭВ}, 0,4\lambda_{ЭВ}, 0,2\lambda_{ЭВ})$. Установлено, что для всех схем зависимости $W = f(\lambda_{PB})$ оказались прямыми линиями, наклонными к оси абсцисс. Их анализ показывает, что для понижения недоотпуска на КЭС и АЭС на $1 \div 7\%$ путем замены ЭВ в схемах ОРУ на более надежные выключатели последние должны иметь $\lambda_{PB} = (0,9 \div 0,4)\lambda_{ЭВ}$ в зависимости от мощности блоков, вида и напряжения схемы.

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемый ввод элегазового выключателя (ЭВ) между трансформатором блока и его двумя выключателями со стороны высшего напряжения в традиционные схемы ОРУ напряжением 330–750 кВ с ЭВ может уменьшить недоотпуск электроэнергии W на КЭС и АЭС на $1 \div 7\%$ (в 9 из 24 схем на $5 \div 7\%$), а на ГЭС увеличить. Здесь и далее значения цифр зависят от мощности блоков, вида и напряжения схем ОРУ.

2. Ввод генераторного выключателя в блоки генератор-трансформатор позволяет уменьшить недоотпуск электроэнергии от ненадежности схемы ОРУ на КЭС в $7 \div 9$ раз, на ГЭС в $4 \div 9$ раз, а затраты на сооружение электростанций в $1,2 \div 6,5$ раза.

3. Замена ВВ на ЭВ со статистической (Россия) частотой отказов $\lambda_{ЭВ} = (0,65 \div 0,7)\lambda_{ВВ}$ может уменьшить ущерб при реконструкции и затраты на сооружение на ГЭС на 0,4–31 % и 0,4–2,4 %, на АЭС и КЭС на 1,3–9 % и 1,2–7,2 %.

4. Чтобы путем замены выключателей в схемах с ЭВ получить такой же эффект, как от ввода ЭВ, надо разработать выключатель с частотой отказов λ_{PB} , которая определяется по полученной в работе зависимости $W = f(\lambda_{PB})$. Так, для уменьшения недоотпуска на упомянутые $1 \div 7\%$ нужны выключатели с $\lambda_{PB} = (0,9 \div 0,4)\lambda_{ЭВ}$.

5. Нет никаких оснований полагать, что так же, как это сделано в статье, нельзя получить аналогичные результаты при любых известных статистических данных $\lambda_{ЭВ}$ различных фирм. Они, как и результаты, полученные в статье, могут оказаться полезными при определении стратегии энергосбережения на электростанциях и целесообразности разработки новых выключателей.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP09058249).

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ структурной надежности главных схем электрических соединений атомных электростанций / М. А. Короткевич, А. Л. Старжинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 3. С. 191–197. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-191-197>.
2. Reliability Evaluation for Different Power Plant Busbar Layouts by Using Sequential Monte Carlo Simulation / M. Moazzami [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013. Vol. 53. P. 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.019>.
3. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 208 с.
4. Гук, Ю. Б. Теория надежности. Введение / Ю. Б. Гук, В. В. Карпов, А. А. Лапидус. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2009. 171 с.
5. Околович, М. Н. Проектирование электрических станций: учеб. / М. Н. Околович. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
6. Оценка эффективности применения элегазовых выключателей при реконструкции и новом строительстве электросетевых объектов / В. А. Непомнящий, П. В. Илюшин // Надежность и безопасность энергетики. 2012. № 4 (19). С. 13–21.
7. Методические указания по технико-экономическому обоснованию электросетевых объектов. Эталоны обоснований: СТО 56947007-29.240.01.271-2019. Введ. 2019-07-24. М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2019. 33 с.
8. The Reliability of the Gas-Filled 110–750 kv Circuit Breaker Units of Substations / Yu. A. Dementyev [et al.] // Power Technology and Engineering. 2011. Vol. 45, Iss. 2. P. 151–154. <https://doi.org/10.1007/s10749-011-0240-6>.
9. Балаков, Ю. Н. Проектирование схем электроустановок / Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. М.: Издательский дом МЭИ. 2016. 288 с.
10. International Surveys on Circuit-Breaker Reliability Data for Substation and System Studies / A. Janssen, D. Makareinis, C. E. Sölver // IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. Vol. 29. Iss. 2. P. 808–814. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2274750>.
11. Электротехнический справочник: в 4 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]; гл. ред. А. И. Попов. М.: Издательство МЭИ. 2004. Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии. 964 с.
12. Электрическая часть станций и подстанций / А. А. Васильев [и др.]. М.: Энергоатомиздат. 1990. 576 с.
13. Старшинов, В. А. Электрическая часть электростанций и подстанций / В. А. Старшинов, М. В. Пираторов, М. А. Козина. М.: Издательский дом МЭИ. 2015. 296 с.
14. Revision of TRV requirements for the application of generator circuit-breakers / M. Palazzo [et al.] // Electric Power Systems Research. 2016. Vol. 138. P. 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.030>.
15. Укрупненные стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35–750 кВ: утв. Приказом ОАО «ФСК ЕЭС». М., 2013. 74 с.
16. Открытое распределительное устройство электрической станции с двумя блоками генератор-трансформатор и двумя линиями: пат. № 35969 Республики Казахстан / А. С. Барукин, А. Ж. Динмуханбетова, А. Г. Калтаев, М. Я. Клецель. Опубл. 02.12.2022, бюл. № 48.

Поступила 05.04.2023 Подписана в печать 06.06.2023 Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Korotkevich M. A., Starzhinskij A. L. (2017) The Analysis of Structural Reliability of the Main Electric Connection Circuits of Nuclear Power Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (3), 191–197. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-191-197> (in Russian).
2. Moazzami M., Hemmati R., Fesharaki F. H., Rad S. R. (2013) Reliability Evaluation for Different Power Plant Busbar Layouts by Using Sequential Monte Carlo Simulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 53, 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.019>.
3. Guk Yu. B. (1990) *Reliability Theory in Electric-Power Engineering*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 208 (in Russian).
4. Guk Yu. B., Karpov V. V., Lapidus A. A. (2009) *Theory of Reliability. Introduction*. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ. 171 (in Russian).
5. Okolovich M. N. (1982) *Power Plant Design*. Moscow, Energoizdat Publ. 400 (in Russian).
6. Nepomnyashchy V. A., Ilyushin P. V. (2012) Evaluating the Effectiveness of the Use of Gas Insulated Circuit Breakers in the Reconstruction and New Construction of Power Supply Facilities. *Safety and Reliability of Power Industry*, (4), 13–21 (in Russian).
7. STO (Organization Standard) 56947007-29.240.01.271-2019. *Guidelines for the Feasibility Study of Electric Grid Facilities. Justification Standards*. Moscow, UES FGC Publ. 2019. 33 (in Russian).
8. Demytyev Yu. A., Misrikhanov M. Sh., Stolyarov E. I., Abdurakhmanov A. M., Fedorov V. E., Shuntov A. V. (2011) The Reliability of the Gas-Filled 110–750 kv Circuit Breaker Units of Substations. *Power Technology and Engineering*, 45 (2), 151–154. <https://doi.org/10.1007/s10749-011-0240-6>.
9. Balakov Yu. N., Misrikhanov M. Sh., Shuntov A. V. (2016) *Design of Electrical Installation Circuits*. Moscow, MEI Publ. 288 (in Russian).
10. Janssen A., Makareinis D., Sölver C. E. (2013) International Surveys on Circuit-Breaker Reliability Data for Substation and System Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29 (2), 808–814. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2274750>.
11. Gerasimov V. G., D'yakov A. F., Il'inskii N. F., Labuntsov V. A., Morozkin V. P., Orlov I. N., Popov A. I., Stroeve V. A. (eds.) (2004) *Reference Book in Electrical Engineering. V. 3. Electrical Power Production, Transmission, and Distribution*. Moscow, MEI Publishing House Publ. 964 (in Russian).
12. Vasil'ev A. A., Kryuchkov I. P., Nayashkova E. F., Okolovich M. N. (1990) *Electrical Section of Stations and Substations*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 576 (in Russian).
13. Starshinov V. A., Piratorov M. V., Kozinova M. A. (2015) *Electrical Section of Power Plants and Substations*. Moscow, MEI Publ. 296 (in Russian).
14. Palazzo M., Popov M., Marmolejo A., Delfanti, M. (2016) Revision of TRV Requirements for the Application of Generator Circuit-Breakers. *Electric Power Systems Research*, 138, 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.030>.
15. *Aggregated Cost Indicators of Power Lines and 35–750 kV Substations*. Moscow, UES FGC Publ. 2013. 74 (in Russian).
16. Barukin A. S., Dinmukhanbetova A. Zh., Kataev A.G., M. Ya. Kletsel' M. Ya. (2022) *An Open Switchgear of an Electric Station with Two Generator-Transformer Units and Two Lines*. Patent of the Republic of Kazakhstan No 35969 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-344-353>

УДК 621.311:681.515

Применение наблюдающего устройства в системе управления для электромеханической системы с распределенными параметрами в механической части

А. П. Корнеев¹⁾, Г. С. Ленеvский¹⁾, Итонг Нью²⁾

¹⁾Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь),

²⁾Аньянский университет (Аньян, Китай)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Рассмотрена система с распределенными параметрами в механической части. Приведены примеры таких систем. Указана причина учета распределенности параметров в таких системах. Рассмотрены существующие методы исследования и расчета систем управления. Представлена краевая задача системы с распределенными параметрами. Предложено применение наблюдающего устройства как одного из способов реализации системы управления для системы с распределенными параметрами. Показана необходимость использования замкнутой системы управления и сложности ее реализации. Представлена структурная схема разрабатываемого способа управления. Приведены передаточные функции, описывающие систему с распределенными параметрами. Представлен математический расчет наблюдающего устройства. Получен способ реализации замкнутой системы управления по промежуточной координате для электромеханической системы с распределенными параметрами в механической части с применением наблюдающего устройства, которое находится в обратной связи и восстанавливает выходную скорость без непосредственного измерения. Для наблюдающего устройства определен общий вид передаточной функции. Представлены преимущества и недостатки передаточной функции наблюдающего устройства, графический вид простой реализации наблюдающего устройства с выделенным вспомогательным устройством в обратной связи. Описана аппроксимация, которая применяется для систем с распределенными параметрами. Получены выводы аппроксимации. По параметрам экспериментальной установки получены аппроксимированные передаточные функции механической части системы с распределенными параметрами без наблюдающего устройства и с наблюдающим устройством. Представлена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика механической части системы с распределенными параметрами с наблюдающим устройством и без наблюдающего устройства для экспериментальной установки для самого простого случая, а также способ реализации замкнутой системы управления по промежуточной координате для электромеханической системы с распределенными параметрами в механической части с применением наблюдающего устройства.

Ключевые слова: система с распределенными параметрами, резонанс, наблюдающее устройство, восстановление данных, гиперболическая функция

Для цитирования: Корнеев, А. П. Применение наблюдающего устройства в системе управления для электромеханической системы с распределенными параметрами в механической части / А. П. Корнеев, Г. С. Ленеvский, Итонг Нью // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*, 2023. Т. 66, № 4. С. 344–353. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-344-353>

Адрес для переписки
Корнеев Андрей Петрович
Белорусско-Российский университет
просп. Мира, 43,
212000, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 742-19-48
ankorn79@mail.ru

Address for correspondence
Korneev Andrew P.
Belarusian-Russian University
Mira Ave, 43,
212000, Mogilev, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 742-19-48
ankorn79@mail.ru

Application of the Surveillance Device in the Control System for an Electromechanical System with Distributed Parameters in its Mechanical Part

A. P. Korneev¹⁾, G. S. Lenevsky¹⁾, Yitong Niu²⁾

¹⁾Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus),

²⁾Anyang University (Anyang, China)

Abstract. A system with distributed parameters in its mechanical part is considered. Examples of such a system are given. The reason for taking into account the distribution of parameters in such systems is indicated. Existing methods of research and calculation of control systems are considered. The boundary value problem for a system with distributed parameters is presented. The use of a surveillance device as one of the ways to implement a control system for a system with distributed parameters is proposed. The necessity of using a closed control system and the complexity of its implementation are demonstrated. A block diagram of the control method being developed is presented. Also, transfer functions describing a system with distributed parameters are given; the mathematical calculation of the surveillance device is given as well. A method for implementing a closed control system along an intermediate coordinate for an electromechanical system with distributed parameters in the mechanical part using a surveillance device has been obtained. The surveillance device is in feedback and restores the output speed without measuring it directly. A general view of the transfer function is determined for the surveillance device. The advantages and disadvantages of the transfer function of the surveillance device and a graphical view of a simple implementation of the surveillance device with a dedicated auxiliary device in feedback are presented. An approximation that is used for systems with distributed parameters is described. Approximation conclusions are obtained. According to the parameters of the experimental installation, approximated transfer functions of the mechanical part of the system with distributed parameters without a surveillance device and with a surveillance device are obtained. The LACH of the mechanical part of the system with distributed parameters with a surveillance device and without a surveillance device for an experimental installation for the simplest case is presented, as well as a method for implementing a closed control system along an intermediate coordinate for an electromechanical system with distributed parameters in the mechanical part using a surveillance device.

Keywords: system with distributed parameters, resonance, surveillance device, data recovery, hyperbolic function

For citation: Korneev A. P., Lenevsky G. S., Niu Yitong (2023) Application of the Surveillance Device in the Control System for an Electromechanical System with Distributed Parameters in its Mechanical Part. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 344–353. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-344-353> (in Russian)

Введение

Во многих объектах техники можно найти системы с распределенными параметрами (СРП) для механических элементов. Это, например, подъемные механизмы с тросами или канатами, протяженные линии электропередач, трубопроводы для перекачки различной жидкости, буровые установки с длинными колоннами труб [1–3].

Учет всех возможных свойств и характеристик, самое основное – конечной жесткости кинематических звеньев, необходимо выполнять из-за постоянно увеличивающихся требований к быстродействию и точности систем автоматизированного электропривода (АЭП). Это приводит к рассмотрению механической части электропривода как СРП [3].

Все попытки оптимизации системы электропривода (ЭП), исходя из установившихся представлений, рассматривавших механическую часть электроприводов как жесткую систему, влекли появление автоколебаний в автоматических системах регулирования. Как следствие, это приводило

к снижению точности регулирования, частым обрывам обрабатываемого материала, повышенному искрению на коллекторах электрических машин, а в наиболее негативных случаях – к выходу из строя механического и электрического оборудования [1–3].

Наличие упругости в объекте управления оказывает решающее влияние на работу системы управления, что приводит к изменению стандартных настроек для жестких систем и необходимости применять наблюдатели состояния или резонансные корректирующие регуляторы [4–6].

Проводимые исследования направлены на получение итогового способа проектирования системы управления для электромеханической системы с учетом распределенности параметров.

В настоящее время в теории и практике расчета систем управления СРП намечились два основных метода исследования (аналитический и операционный).

Аналитический метод базируется на математическом аппарате, использующем расчетные функции и дискретное преобразование Лапласа – метод Фурье или метод Даламбера [7].

Решения, получаемые этими методами, – в виде стоячих волн (бесконечного ряда гармоник) или бесконечного ряда падающих и отраженных волн. Эти методы позволяют применить способы исследования, аналогичные тем, которые являются характерными для анализа линейных систем управления. Недостатком является невозможность получить решения в общем виде, что приводит к сложным математическим выводам [8].

В случае решения уравнений в частных производных рассматривается небольшая их часть, связанная с линейными уравнениями с постоянными коэффициентами. При этом существует небольшое количество задач, решаемых в явном виде [8].

Операционный метод основан на применении интегрального преобразования Лапласа [9].

Основная часть

Краевая задача системы с распределенными параметрами имеет следующий вид [10]:

$$\left. \begin{aligned} \rho(x) \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} &= f(x, t), \\ Q(x, 0) &= Q_0(x), Q(0, t) = Q(L, t) \\ \frac{\partial Q}{\partial t}(x, 0) &= Q_1(x), \\ \frac{\partial Q}{\partial t}(x, 0) &= \frac{\partial Q}{\partial t}(L, 0), \\ 0 \leq x \leq L, t \geq 0, \rho(x) \geq 0, E &\geq 0. \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\rho(x)$ – плотность объекта, кг/м³; E – линейный модуль упругости, Н/мм²; Q – смещение точки от положения равновесия, м; $f(x, t)$ – задающее воздействие; L – длина объекта; x – текущая координата.

При работе СРП происходит постоянное изменение переменной x , описывающей положение груза (рабочей массы) в пространстве.

Изменение частоты первого резонанса оказывает существенное влияние на работу всей СРП, так как изменение полосы пропускания электропривода требует корректировки системы управления [10, 11].

Существенное влияние на работу всей системы управления оказывает наличие упругости в объекте управления, что заставляет изменять стандартные настройки, применимые для жестких систем. Одним из возможных решений этой проблемы является применение наблюдающего устройства (НУ), действующего на принципе восстановления данных СРП.

Ярко выраженные резонансные свойства передаточных функций для СРП практически исключают возможность изменения полосы пропускания СРП выше частоты первого резонанса при использовании нерезонансного регулятора.

Замкнутая система управления СРП позволяет это сделать. Но механическая часть СРП в основном имеет пространственно протяженные размеры и реализация замкнутой системы управления практически невозможна. Поэтому будет применяться замкнутая система управления по промежуточной координате для СРП с НУ, которое восстанавливает выходную скорость по промежуточной координате без непосредственного измерения [12, 13].

Применение в системе управления условной обратной связи в точке положения груза x принципиально дает возможность получения системы управления для СРП с увеличенной полосой пропускания.

На рис. 1 представлена структурная схема разрабатываемого способа управления СРП [14].

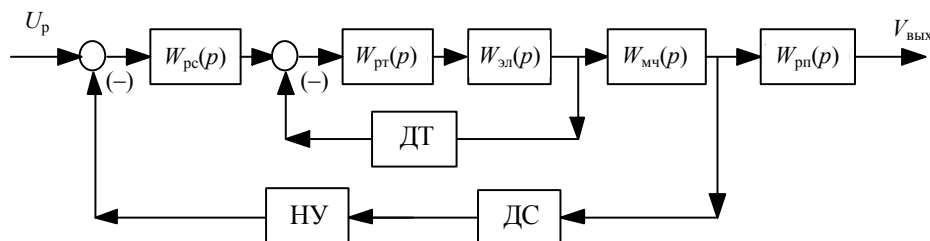


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемого способа управления: U_p – задающее воздействие (сигнал задания); $W_{pc}(p)$ – регулятор скорости; $W_{pt}(p)$ – регулятор тока; $W_{эл}(p)$ – электрическая часть электропривода; $W_{мч}(p)$ – механическая часть электропривода с постоянными параметрами; $W_{рп}(p)$ – механическая часть электропривода с распределенными параметрами; ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости; НУ – наблюдающее устройство

Fig. 1. Block diagram of the control method being developed: U_p – setting effect (setting signal); $W_{pc}(p)$ – speed controller; $W_{pt}(p)$ – current regulator; $W_{эл}(p)$ – electrical part of the drive; $W_{мч}(p)$ – mechanical part of the electric drive with constant parameters; $W_{рп}(p)$ – mechanical part of the drive with distributed parameters; ДТ – current sensor; ДС – speed sensor; НУ – surveillance device

Непосредственное измерение скорости рабочей массы (груза) в СРП с пространственно протяженными размерами очень затруднительно и практически невозможно. Результат измерения возможно получить при

использовании наблюдающего устройства, которое восстанавливает данные без их непосредственного измерения [15, 16].

Передаточная функция движущего усилия к скорости перемещения для любого сечения известна [3]

$$W(x, p) = \frac{ch(\tilde{p}\tilde{x})sh(\tilde{p})}{2a(sh^2(\tilde{p}) + \mu_1\mu_2\tilde{p}^2[ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p}\tilde{x})] + (\mu_1 + \mu_2)\tilde{p}sh(\tilde{p})ch(\tilde{p}))}, \quad (2)$$

где x – текущее расстояние между центром массы 1 и грузом, м; L – расстояние между центрами масс, м; $\tilde{x} = 1 - \frac{x}{L}$ – относительная координата выходной точки; $\mu_i = M_i/M_k$ – i -я относительная масса; a – скорость волны распространения колебаний, м/с, $\tilde{p} = p \frac{L}{a}$ – нормированный оператор Лапласа.

Передаточная функция движущего усилия к скорости перемещения для начального сечения также известна [15]

$$W_1(x, p) = \frac{ch(\tilde{p}\tilde{x})sh(\tilde{p}) + \mu_2\tilde{p}(ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p}\tilde{x}))}{2a(sh^2(\tilde{p}) + \mu_1\mu_2\tilde{p}^2[ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p}\tilde{x})] + (\mu_1 + \mu_2)\tilde{p}sh(\tilde{p})ch(\tilde{p}))}. \quad (3)$$

Отношение передаточной функции (2) к (3) – это передаточная функция НУ

$$W_{\text{кв}}(x, p) = \frac{ch(\tilde{p}\tilde{x})sh(\tilde{p})}{\mu_2\tilde{p}[(ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p}\tilde{x})) + sh(\tilde{p})ch(\tilde{p})]}. \quad (4)$$

Так как в числителе и знаменателе дроби есть одинаковое слагаемое $sh(\tilde{p})ch(\tilde{p})$, то возможно дальнейшее упрощение дроби. Выделена вспомогательная передаточная функция, которая находится в знаменателе, числитель при этом равен 1:

$$W_{\text{кв}}(x, p) = 1/(1 + W_k(x, p)\mu_2\tilde{p}). \quad (5)$$

Вспомогательная передаточная функция $W_k(x, p)$ имеет вид

$$W_k(x, p) = \frac{ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p}\tilde{x})}{ch(\tilde{p}\tilde{x})sh(\tilde{p})}, \quad (6)$$

который представляется более простым и удобным при изучении и моделировании по сравнению с (2) и (3).

Анализ полученной передаточной функции (6) позволяет учитывать вариацию резонансных свойств СРП из-за изменения механических парциальных параметров [17].

Преимущества полученной передаточной функции (6):

- независимость передаточной функции, а также полюсов и нулей передаточной функции от масс;
- более простая реализация и исследование из-за отсутствия степеней при p выше первой в знаменателе передаточной функции;

• возможность дальнейшего преобразования и упрощения из-за отсутствия слагаемых в знаменателе.

Недостатки полученной передаточной функции:

- наличие гиперболических функций;
- наличие дифференцирующего звена.

Графическое представление НУ с выделенным вспомогательным устройством представлено на рис. 2.

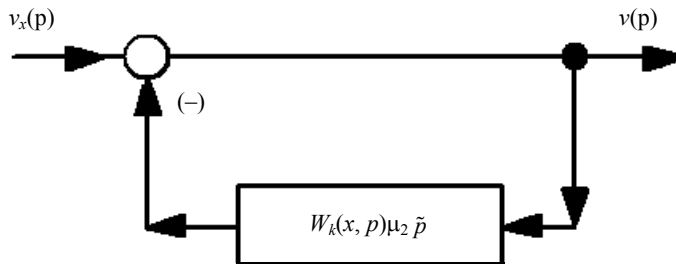


Рис. 2. Графическое представление НУ: $v_x(p)$ – скорость движения для произвольного сечения; $v(p)$ – скорость движения для начального сечения; $W_k(x, p)$ – дополнительная передаточная функция; μ_2 – относительная масса груза; $\tilde{p}$ – нормированный оператор Лапласа

Fig. 2. Graphical representation of MD: $v_x(p)$ – speed of movement for an arbitrary section; $v(p)$ – speed of movement for the initial section; $W_k(x, p)$ – additional transfer function; μ_2 – relative weight of the load; $\tilde{p}$ – normalized Laplace operator

Для реализации условной обратной связи при построении замкнутой системы управления по промежуточной координате для СРП точка подключения условно выбирается в точке положения груза.

НУ преобразует сигнал скорости для начального сечения в сигнал скорости груза, что позволяет реализовать замкнутую систему управления по промежуточной координате для управления электроприводом с СРП при реальном отсутствии обратной связи.

Для исследования электромеханических характеристик СРП разработана экспериментальная установка со следующими параметрами [18]: $\mu_1 = 0,87$, $\mu_2 = 0,46$, $a = 23,5$ м/с, $L_{\max} = 7$ м.

Нормированный оператор Лапласа для экспериментальной установки

$$\dot{p} = p \cdot 7/25 = 0,3 \cdot p. \quad (7)$$

Передаточные функции (2) и (3) являются сложными гиперболическими функциями, преобразование которых практически невозможно. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) этих функций носит явно выраженный резонансный характер. Вид каждого резонанса совпадает с видом резонанса самого простого резонансного звена $1/(p^2 + \omega^2)$. Выполним аппроксимацию передаточной функции (2) на произведение звеньев $1/(p^2 + \omega^2)$ для резонансов и $(p^2 + \omega^2)$ для антирезонансов способом, который описан в [17]. Данный способ позволяет выполнить аппроксимацию, зная только ЛАЧХ.

В MathCad построены ЛАЧХ исходной передаточной функции (2) до и после аппроксимации.

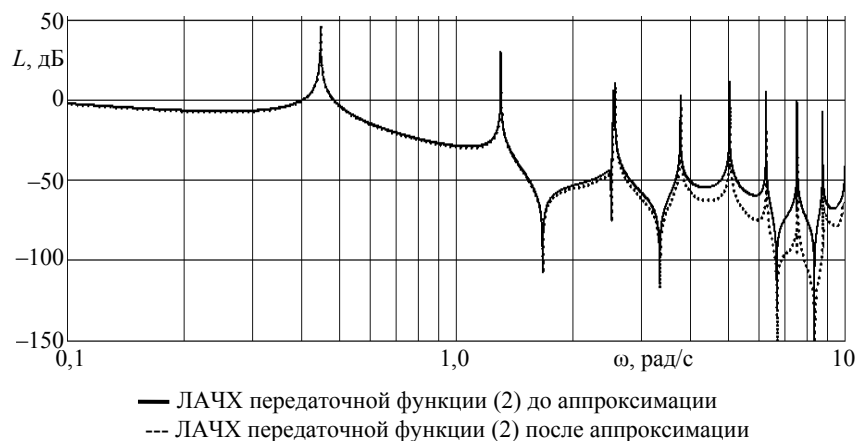


Рис. 3. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика передаточной функции
Fig. 3. Transfer function logarithmic amplitude-frequency characteristic

В результате анализа ЛАЧХ исходной передаточной функции (2) до и после аппроксимации получены выводы:

1. При резонансной частоте ЛАЧХ передаточной функции до и после замены совпадают полностью.
2. Между резонансными частотами ошибка постепенно накапливается по мере приближения к частотам, которые не будут учитываться при замене предложенным способом.
3. Ошибка при начальных частотах практически равна нулю и увеличивается с ростом номера резонансной частоты.
4. Этот способ аппроксимации передаточной функции не является абсолютно точным, но погрешность такой замены является достаточной для инженерных расчетов.

Для самого простого случая $m_2 = 0$ и единичной обратной связи выполнен расчет передаточной функции с НУ по значениям, полученным для экспериментальной установки [19] в диапазоне $[0-10]$ рад/с. Получены передаточные функции механической части СРП без НУ – $W_1(p)$ и механической части СРП с НУ – $W_2(p)$:

$$W_1(p) = (p^2 + 1,85^2)(p^2 + 5,5^2) / [2,25 \cdot p(p^2 + 0,63^2) \cdot (p^2 + 1,3^2)(p^2 + 3,8^2) \times (p^2 + 5^2)](p^2 + 6,6^2) / [(p^2 + 6,1^2)(p^2 + 7,6^2)(p^2 + 8,8^2)], \quad (8)$$

$$W_2(p) = (p^2 + 1,85^2)(p^2 + 5,5^2) / [2,25 \cdot p(p^2 + 1,74 \cdot p + 0,63^2)(p^2 + 1,3^2) \times (p^2 + 3,8^2)(p^2 + 5^2)](p^2 + 6,6^2) / [(p^2 + 6,1^2)(p^2 + 7,6^2)(p^2 + 8,8^2)]. \quad (9)$$

Результаты моделирования

Выполнено моделирование в MathCad передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$. На рис. 4 тонкой линией показана ЛАЧХ механической части СРП

без НУ $W_1(p)$, а сплошной – ЛАЧХ механической части СРП с НУ $W_2(p)$, полученные по параметрам экспериментальной установки.

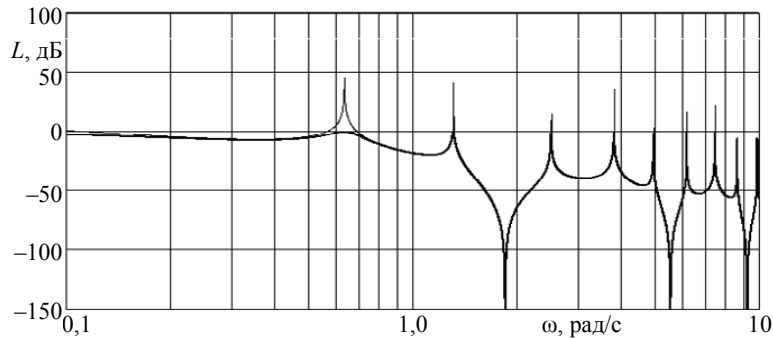


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика механической части системы с распределенными параметрами

Fig. 4. Logarithmic amplitude-frequency characteristic of the mechanical part of a system with distributed parameters

Первый резонанс в исследуемой СРП для экспериментальной установки без НУ находится на частоте $0,63 / (2 \cdot 3,14) = 1$ Гц, а в СРП с НУ на частоте $1,31 / (2 \cdot 3,14) = 2$ Гц. Увеличение полосы пропускания ЭП ($2/1 = 2$) в два раза. Получается, что сглаживание первого резонанса (наиболее опасного) происходит при применении НУ, которое имитирует дополнительный контур [20, 21].

Использование резонансного регулятора скорости, учитывающего первую резонансную частоту, более сложное, чем НУ, так как резонансные частоты при работе изменяются, потребуется усложнение резонансного регулятора, а в НУ это выполняется само собой.

При изменении массы и положения груза для расчета спектра резонансных частот СРП может быть использована программа [22].

ВЫВОДЫ

1. Применение наблюдающего устройства в системе управления для электромеханической системы с распределенными параметрами в механической части позволяет реализовать замкнутую систему управления без непосредственного измерения конечной координаты.

2. Применение наблюдающего устройства позволяет увеличить полосу пропускания и, следовательно, быстродействие электропривода.

3. Способ реализации замкнутой системы управления заключается в следующем:

- определяются необходимые параметры наблюдающего устройства (расстояние между центром массы 1 и грузом, расстояние между центрами масс СРП, относительная координата выходной точки (груза), относительная масса груза, скорость распространения колебаний, нормированный оператор Лапласа);

- по (5) и (6) реализуется наблюдающее устройство для перемещающегося груза.

4. Разработанный способ реализации замкнутой системы управления может использоваться для электроприводов грузоподъемных устройств или в длинных линиях электропередач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zames, G. On Spectral Mapping, Higher Order Circle Criteria and Periodically Varying System. IEEE Trans / G. Zames, R. Kallman // IEEE Transactions on Automatic Control. 1970. Vol. 15, No 6. P. 649–652. <https://doi.org/10.1109/tac.1970.1099587>.
2. Jagannathan, S. Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems / J. Sarangapani. CRC Press, 2006. 622 p. <https://doi.org/10.1201/9781420015454>.
3. Рассудов, Л. Н. Электроприводы с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мязель. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. от-ние, 1987. 144 с.
4. Brockett, R. W. The status of Stability Theory for Deterministic Systems / R. W. Brockett // IEEE Transactions on Automatic Control. 1966. Vol. 11, No. 3. P. 596–606. <https://doi.org/10.1109/tac.1966.1098354>.
5. Ortega, R. Almost Periodic Equations and Conditions of Ambrosetti – Prodi Type / R. Ortega, M. Tarallo // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 2003. Vol. 135, No 2. P. 239–254. <https://doi.org/10.1017/s0305004103006662>.
6. Бутковский, А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. М.: Наука, 1975. 230 с.
7. Деч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования / Г. Деч. М.: Наука, 1971. 288 с.
8. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Гобельков. М.: Наука, 1987. 632 с.
9. Бутенин, Н. В. Введение в теорию нелинейных колебаний / Н. В. Бутенин. М.: Наука, 1991. 256 с.
10. Nagendga, K. S. Frequency Domain Criteria for Absolute Stability / K. S. Nagendga, J. H. Taylor. N. Y. and London: Academic Press, 1973. 358 p.
11. Corduneanu, C. Integral Equations and Stability of Feedback Systems / C. Corduneanu. N. Y.: Acad. Press, 1973. 357 p.
12. Терехов, В. М. Учет упругости длинных канатов в динамике электропривода подъемников / В. М. Терехов // Электричество. 1966. № 11. С. 60–65.
13. Willems, J. C. On the Asymptotic Stability of the Null Solution on Linear Differential Equations with Periodic Coefficients / J. C. Willems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1968. Vol. 13, No 1. P. 65–72. <https://doi.org/10.1109/tac.1968.1098793>.
14. Control of Complex Systems. Theory and Applications / eds.: K. G. Vamvoudakis, S. Jagannathan. Butterworth-Heinemann, 2016. 386 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02422-4>.
15. Кузовков, Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.
16. Корнеев, А. П. Применение наблюдателей за состоянием в системах с распределенными параметрами / А. П. Корнеев, Г. С. Ленеvский // Информационные технологии, энергетика и экономика: материалы II межрегиональной науч.-техн. конф., Смоленск, 13–14 апреля 2005 г. Смоленск: МЭИ (ТУ), 2005. С. 40–44.
17. Корнеев, А. П. Новый способ аппроксимации механической части нестационарной электромеханической системы с распределенными параметрами / А. П. Корнеев // Наука настоящего и будущего: сб. материалов V науч.-практ. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 17–18 марта 2017 г. Санкт-Петербург: ЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 168–170.
18. Толочко, О. І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостережачими стану / О. І. Толочко. Донецьк: Норд-Пресс, 2004. 298 с.
19. Karneyev, A. P. Development of a Stand for Research of Systems with the Distributed Parameters / A. P. Karneyev, G. S. Lenevsky // Journal of the Technical University of Gabrovo. 2011. Vol. 41. P. 32–35.
20. Jagannathan, S. Optimal Networked Control Systems with MATLAB / S. Jagannathan, Hao Xu. CRC Press, 2016. 386 p. <https://doi.org/10.1201/b19390>.
21. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. СПб.: Корона принт, 2001. 320 с.
22. Корнеев, А. П. Программа «Расчет распределения резонансных частот при различном положении и различной массе груза»: заявка ВУ С20150095 / А. П. Корнеев, Г. С. Ленеvский. Оpubл. 02.10.2015.

Поступила 06.01.2023 Подписана в печать 09.03.2023 Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Zames G., Kallman R. (1970) On Spectral Mapping, Higher Order Circle Criteria and Periodically Varying System. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 15 (6), 649–652. <https://doi.org/10.1109/tac.1970.1099587>.
2. Jagannathan S. (2006) *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems*. CRC Press. 622. <https://doi.org/10.1201/9781420015454>.
3. Rassudov L. N., Myadzel V. N. (1987) *Electric Drives with Distributed Parameters of Electromechanical Elements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 144 (in Russian).
4. Brockett R. W. (1966) The Status of Stability Theory for Deterministic Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11 (3), 596–606. <https://doi.org/10.1109/tac.1966.1098354>.
5. Ortega R., Tarallo M. (2003) Almost Periodic Equations and Conditions of Ambrosetti – Prodi Type. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 135 (2), 239–254. <https://doi.org/10.1017/s0305004103006662>.
6. Butkovsky A. G. (1975) *Control Methods for Systems with Distributed Parameters*. Moscow, Nauka Publ. 230 (in Russian).
7. Doetsch G. (1971) *Guide to the Practical Application of the Laplace Transform and Z-Transform*. Moscow, Nauka Publ. 288 (in Russian).
8. Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Gobelkov G. M. (1987) *Numerical Methods*. Moscow, Nauka Publ. 632 (in Russian).
9. Butenin N. V. (1991) *Introduction to the Theory of Nonlinear Oscillations*. Moscow, Nauka Publ. 256 (in Russian).
10. Nagendga K. S., Taylor J. H. (1973) *Frequency Domain Criteria for Absolute Stability*. Academic Press, N. Y. and London. 358.
11. Corduneanu C. (1973) *Integral Equations and Stability of Feedback Systems*. Acad. Press, N. Y. 357.
12. Terekhov V. M. (1966) Accounting for the Elasticity of Long Ropes in the Dynamics of the Electric Drive of Lifts. *Elektropichestvo* [Electricity], (11), 60–65 (in Russian).
13. Willems J. C. (1968) On the Asymptotic Stability of the Null Solution on Linear Differential Equations with Periodic Coefficients. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 13 (1), 65–72. <https://doi.org/10.1109/tac.1968.1098793>.
14. Vamvoudakis K. G., Jagannathan S. (eds). (2016) *Control of Complex Systems. Theory and Applications*. Butterworth-Heinemann. 386. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02422-4>.
15. Kuzovkov N. T. (1976) *Modal Control and Monitoring Devices*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 184 (in Russian).
16. Korneev A. P., Lenevsky G. S. (2005) Involvement of State Observers in Systems with Distributed Parameters. *Informatsionnye Tekhnologii, Energetika i Ekonomika: Vaterialy II Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf., Smolensk, 13–14 Aprelya 2005 g.* [Information Technologies, Energy and Economics: Proceedings of the II Interregional Scientific and Technical Conference, Smolensk, April 13–14, 2005]. Smolensk, MPEI (TU), 40–44 (in Russian).
17. Korneev A. P. (2017) A New Method for Approximating the Mechanical Section of a Non-Stationary Electromechanical System with Distributed Parameters. *Nauka Nastoyashchego i Budushchego: Sb. Materialov v Nauch.-Prakt. Konf. s Mezhdunar. Uchastiem, Sankt-Peterburg, 17–18 Marta 2017 g.* [Science of the Present and Future: Collection of Materials of the V Scientific and Practical Conference with International Participation, St. Petersburg, March 17–18, 2017]. St. Petersburg, “LETI” ETU, 168–170 (in Russian).
18. Tolochko O. I. (2004) *Analysis and Synthesis of Electromechanical Systems under Observation*. Donetsk, Nord-Press Publ. 298 (in Ukrainian).
19. Karneyev A. P., Lenevsky G. S. (2011) Development of a Stand for Research of Systems with the Distributed Parameters. *Journal of the Technical University of Gabrovo*, 41, 32–35.
20. Jagannathan S., Hao Xu (2016) *Optimal Networked Control Systems with MATLAB*. CRC Press. 386. <https://doi.org/10.1201/b19390>.
21. German-Galkin S. G. (2001) *Computer Modeling of Semiconductor Systems in MATLAB 6.0*. St. Petersburg, Korona Print Publ. 320 (in Russian).
22. Korneev A.P., Lenevsky G. S. (2015) The Program of “Calculation of the Distribution of Resonant Frequencies at Different Positions and Different Weights of the Load”. Application Republic of Belarus No C20150095 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>

УДК 620.97

Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом

В. А. Седнин¹⁾, Р. С. Игнатович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В рамках политики «обезуглероживания» экономики предлагается технология получения водорода из местных видов топлива и горючих отходов человеческой деятельности в рамках развития функциональности теплофикационных циклов производства энергии. Целью исследования является оценка энергетической эффективности паросиловой мини-ТЭЦ, работающей на местных видах топлива, с модулем производства водорода термохимическим способом. Представлен краткий литературный обзор термохимических циклов производства водорода и показано, что наиболее перспективными считаются гибридные циклы медь-хлор Cu–Cl. В программной среде *Aspen Hysys* была синтезирована математическая модель мини-ТЭЦ с пятиступенчатым циклом производства водорода, которая может в дальнейшем быть использована как компонент в составе цифрового двойника. По результатам анализа математической модели было определено, что удельное потребление электрической энергии на 1 кг водорода для такой схемы составит 9,11 (кВт·ч)/кг, что в среднем в пять раз меньше, чем при производстве водорода электролизом, остальная часть требуемой энергии замещена тепловой, при этом максимальный коэффициент использования топлива мини-ТЭЦ с модулем производства водорода, использующей в качестве топлива отходы древесины, составил 83,1 %, в том числе тепловой КПД составляет 51,5 %, эффективность производства водорода по низшей теплоте сгорания – 31%, электрический КПД по отпуску электроэнергии в сеть – 0,6 %. Для сравнения максимальный коэффициент использования топлива паросиловой мини-ТЭЦ той же электрической мощности достигает 90,9 %. Расширение опций мини-ТЭЦ на местных видах топлива путем ввода в ее схему блока производства водорода гибридным термохимическим методом позволяет повысить маневренность станции, что предполагает возможность организации функционирования мини-ТЭЦ в соответствии с требованиями тепловых потребителей и электрического графика нагрузок энергосистемы в часы максимумов и минимумов ее потребления за счет изменения электрической мощности отпуска в сеть или увеличения мощности потребления электроэнергии из внешней сети до мощности, требуемой для производства водорода. В заключение указывается на возможность развития исследуемой схемы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в сторону дальнейшей утилизации продуктов сгорания с целью генерации искусственного природного газа, который в этом случае можно назвать «зеленым».

Ключевые слова: производство водорода, зеленая энергетика, термохимический метод, цикл Cu–Cl, *Aspen Hysys*, мини-ТЭЦ, местные виды топлива, математическая модель, энерготехнологическая установка, ОРЦ-установка, регенерация

Для цитирования: 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. Т. 66, № 4. С. 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Analysis of the Efficiency of Hydrogen Production Technology at Mini-CHP Plants Using Local Fuels by Thermochemical Method

V. A. Sednin¹⁾, R. S. Ignatovich¹⁾

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

Abstract. Within the framework of the policy of “decarbonization” of the economy, a technology for hydrogen producing from local fuels (LF) and combustible waste of human activity is proposed as a part of the development of the functionality of heating cycles of energy production. The aim of the present study is to evaluate the energy efficiency of a steam-powered mini-CHP plant operating on local fuels with a thermochemical hydrogen production module. A brief literature review of thermochemical cycles of hydrogen production is presented, and it is shown that hybrid copper-chlorine Cu–Cl cycles are recognized as the most promising. In the *Aspen Hysys* software environment, a mathematical model of a mini-CHP plant with a five-stage hydrogen production cycle was synthesized, which can later be used as a component in the digital twin. According to the results of the analysis of the mathematical model, it was determined that the specific consumption of electric energy per 1 kg of hydrogen for such a scheme will be 9.11 (kW·h)/kg, which is on average more than five times less than in the production of hydrogen by electrolysis, the rest of the required energy is replaced by thermal one, while the maximum fuel utilization factor of mini-CHP with a hydrogen production module using wood waste as fuel amounted to 83.1 %, including a thermal efficiency of 51.5 %, the efficiency of hydrogen production at the lowest calorific value is 31 %, the electrical efficiency for the supply of electricity to the grid is 0.6 %. For comparison, the maximum fuel utilization of a steam-powered mini-CHP of the same electrical capacity reaches 90.9 %. The expansion of mini-CHP options operating on local fuels by introducing a hydrogen production unit by hybrid thermochemical method into its scheme makes it possible to increase the maneuverability of the station, which implies the possibility of organizing the operation of mini-CHP in accordance with the requirements of thermal consumers and electrical graph-reducing the loads of the power system during the hours of maxima and minima of its consumption by changing the electrical power supply to the network or increasing the power consumption of electricity from the external network to the power required for hydrogen production. In conclusion, the possibility of developing the studied scheme of a mini-CHP operating on local fuels towards further utilization of combustion products in order to generate artificial natural gas, which in this case can be called “green”, is indicated.

Keywords: hydrogen production, green energy, thermochemical method, Cu–Cl cycle, *Aspen Hysys*, mini-CHP, local fuels, mathematical model, energy-and-technology installation, ORC-module, regeneration

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373> (in Russian)

Введение

Подписание в 2015 г. Парижского климатического соглашения окончательно закрепило намерение мирового сообщества постепенно перейти на низкоуглеродные источники первичной энергии [1]. В настоящее время в рамках этой концепции широкий интерес исследователей привлекают возобновляемые источники энергии: солнечная, ветровая, геотермальная и прочие виды. Однако возобновляемые источники энергии обладают рядом недостатков: низкая плотность первичных энергопотоков, нестабильность и непостоянство выработки энергии в зависимости от временных и погодных условий, низкая энергоэффективность преобразования и др. [2]. По этой причине группа исследователей [3–5] сходятся во мнении о значительном потенциале использования водорода в качестве энергоносителя

в промышленности и энергетике. В частности, отмечается, что водород может рассматриваться как промежуточный энергоноситель и средство накопления избыточной электрической энергии.

Сегодня наиболее распространенными технологиями получения водорода в промышленных масштабах являются паровая и парокислородная конверсия природного газа [6]. В условиях стран, не имеющих значительных источников природного газа, к которым относится и Республика Беларусь, такой метод производства водорода может оказаться нецелесообразным ввиду непостоянства цен на импортные энергоносители. Широкое внедрение паровой конверсии метана может привести к увеличению доли природного газа в приходной части энергетического баланса и в результате негативно сказаться на энергетической безопасности страны, кроме того, в этом варианте замена метана водородом в энергетике и промышленности приводит только к дополнительным проблемам, практически не влияя на экологическую составляющую технологических процессов.

Альтернативные методы производства водорода заключаются в расщеплении воды с применением электрической или другой энергии. Наибольшее промышленное применение среди них нашел электролиз, который также рассматривается как потребитель-регулятор для сглаживания неравномерности потребления электрической энергии [7]. В то же время за последние годы было выполнено множество исследований производства водорода термохимическим методом. Данный метод заключается в проведении ряда химических реакций, для протекания которых подводятся вода, а также либо только тепловая энергия, либо тепловая и электрическая энергия, в результате чего образуются водород и кислород. В настоящее время среди термохимических технологий наиболее перспективным считается термохимический цикл Cu–Cl [8].

Для Республики Беларусь в условиях образовавшегося после запуска в эксплуатацию двух блоков АЭС профицита электрической энергии [9] электролиз кажется наиболее подходящей технологией производства водорода. Однако, согласно [10], термохимические методы производства водорода по сравнению с электролизом потенциально могут иметь более высокую эффективность, а также экономические преимущества при расширении масштаба производства водорода. Отмечается, что непосредственное использование тепловой энергии напрямую в термохимическом методе позволит избежать потерь энергии на производство электрической энергии, необходимой для осуществления электролиза. В связи с решением проблемы снижения выбросов CO₂ в большинстве работ по применению термохимических методов производства водорода рассматривается использование ядерной или солнечной энергии [8, 11, 12]. Однако внедрение термохимических технологий в схему действующей атомной электростанции может оказаться проблематичным. В Республике Беларусь существует возможность реализации данного метода на базе мини-ТЭЦ, использующих местные виды топлива (МВТ), а именно древесную щепу, отходы деревообрабатывающей промышленности, а также промышленные и бытовые органические отходы. Данное техническое решение хорошо согласуется с тем, что, по данным Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь [13], более 40 % территории страны занимают леса, а древесина относится к возобновляемым источникам энергии, ее использование в качестве топлива не приводит к повышению уровня CO₂ в атмосфере.

С этой точки зрения вызывает практический интерес определение энергетической эффективности производства водорода на мини-ТЭЦ, работающей на МВТ, при включении в нее комплекса оборудования для реализации термохимической технологии в условиях Республики Беларусь. Для этого текущие разработки основ протекания химических процессов, представленные в литературных источниках, были связаны с конкретным теплоисточником, а в программной среде *Aspen Hysys* была построена математическая модель топливно-регенеративного паросилового блока мини-ТЭЦ на МВТ. В качестве исходных данных по протекающим термохимическим реакциям были использованы экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках [10, 11, 14, 15].

Основы термохимического метода получения водорода

Как отмечалось выше, среди термохимических методов получения водорода можно выделить термические циклы, где требуется подводить только тепловую энергию и подготовленную воду, и гибридные термохимические циклы, где требуется дополнительный подвод электрической энергии. При этом выделяют три наиболее перспективные группы термохимических циклов получения водорода: группа с хлором (Cu–Cl, Mg–Cl, Fe–Cl, V–Cl), группа с серой (S–I, H_2S), группа оксидов металлов (ZnO/Zn). На рис. 1 представлена диаграмма, отражающая отношения основных показателей эффективности (энергетическая и эксергетическая эффективность, а также стоимость 10 кг получаемого водорода) различных групп термохимических циклов, приведенных в работе [16], там же представлен подробный сравнительный анализ групп термохимических циклов.

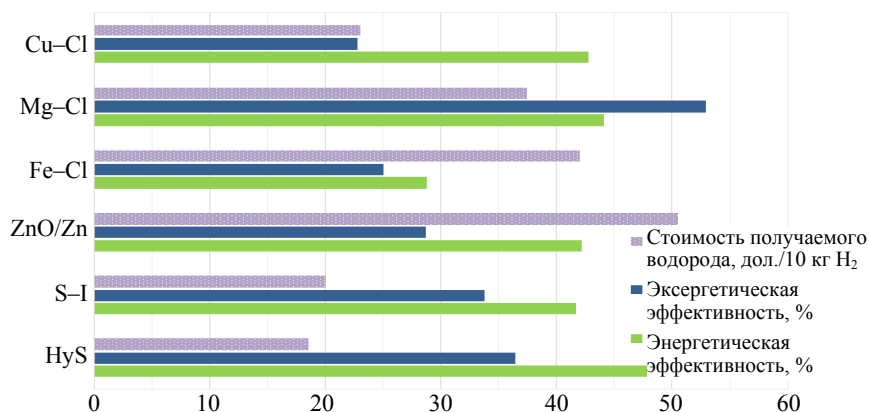


Рис. 1. Основные показатели термохимических циклов

Fig. 1. The main indicators of thermochemical cycles

В [16] показано, что циклы Cu–Cl протекают при наименьшей рабочей температуре 450–500 °С, что значительно снижает затраты на материалы и техническое обслуживание [17] и позволяет использовать для утилизации тепловые потоки с относительно низкими температурами. При этом они обладают высокой энергетической эффективностью, потенциально самой низкой себестоимостью производимого водорода, а промежуточные реакции протекают практически без побочных реакций [17]. К недостаткам циклов Cu–Cl относятся необходимость работы с твердыми вещества-

ми, образующимися в ходе промежуточных реакций, а также работа с опасной соляной кислотой HCl. Сотрудники *Atomic Energy of Canada LTD (AECL)* в своих работах [18, 19] так же выделяют термохимические циклы Cu–Cl для получения водорода как наиболее перспективные. В этой связи нами для анализа эффективности производства водорода на мини-ТЭЦ, работающей на MBT, были выбраны гибридные термохимические циклы Cu–Cl.

В работе [20] подробно представлены химические реакции преобразования Cu–Cl для трех-, четырех- и пятиступенчатых циклов производства водорода. В данной работе рассматривается модель пятиступенчатого цикла получения водорода гибридным термохимическим методом, подробно описанным в работе [10]. Выбор такого цикла связан с ограниченностью температуры дымовых газов, которую можно получить при сжигании MBT. Как отмечается в работе [20], увеличение количества ступеней в термохимическом цикле приводит к снижению температурного уровня и повышению энергетической эффективности процесса производства водорода. Однако при этом повышаются количество используемого оборудования и эксергетические потери при протекании процесса. В табл. 1 представлены основные термохимические реакции, протекающие в пятиступенчатом термохимическом цикле.

Таблица 1

Реакции, протекающие в пятиступенчатом термохимическом цикле [10]

Reactions that occur during a five-step thermochemical cycle [10]

Реакция	Химическая реакция	Температура реакции, °C
1. Гидролиз	$2\text{CuCl}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{g})$	400–450
2. Производство O ₂	$\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2(\text{s}) \rightarrow 2\text{CuCl}(\text{l}) + 1/2\text{O}_2(\text{g})$	500–550
3. Электролиз	$4\text{CuCl}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{CuCl}_2(\text{aq}) + 2\text{Cu}(\text{s})$	20–80
4. Сушка	$\text{CuCl}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{CuCl}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$	80–150
5. Производство H ₂	$2\text{Cu}(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{g}) \rightarrow 2\text{CuCl}(\text{l}) + \text{H}_2(\text{g})$	430–475

В общем виде пятиступенчатый термохимический цикл получения водорода методом Cu–Cl заключается в следующем [10]: перегретый водяной пар и твердый CuCl₂, получаемый в распылительной сушилке, с одинаковой температурой 400 °C поступают в реактор гидролиза с кипящим слоем, где протекает реакция 1. Данная реакция является эндотермической и протекает с поглощением теплоты, а в результате выделяется HCl в газообразной форме и CuO·CuCl₂ в твердом виде. Полученный таким образом CuO·CuCl₂ далее нагревается до температуры 500 °C, в результате чего, согласно реакции 2, образуется газообразный кислород и жидкий расплав CuCl, который в дальнейшем охлаждается до температур 20–80 °C и кристаллизуется. Твердый CuCl направляется на электролиз для получения твердой меди и CuCl₂. Электролизу соответствует реакция 3. Вода является катализатором электролиза и не используется в реакции, а выходит в виде водного раствора с CuCl₂. Данный водный раствор направляется в распылительную сушилку (реакция 4) для получения твердого CuCl₂, направляемого на гидролиз. Полученная в процессе электролиза твердая медь вместе

с HCl , полученной в результате гидролиза, вступают в экзотермическую реакцию 5, согласно которой образуются водород и жидкий CuCl .

Технологическая схема мини-ТЭЦ на местных видах топлива для производства водорода термохимическим методом

На рис. 2 представлена принципиальная схема мини-ТЭЦ, работающей на МВТ, с опцией производства водорода термохимическим методом Cu-Cl . В качестве топлива на мини-ТЭЦ на МВТ используется древесная щепа.

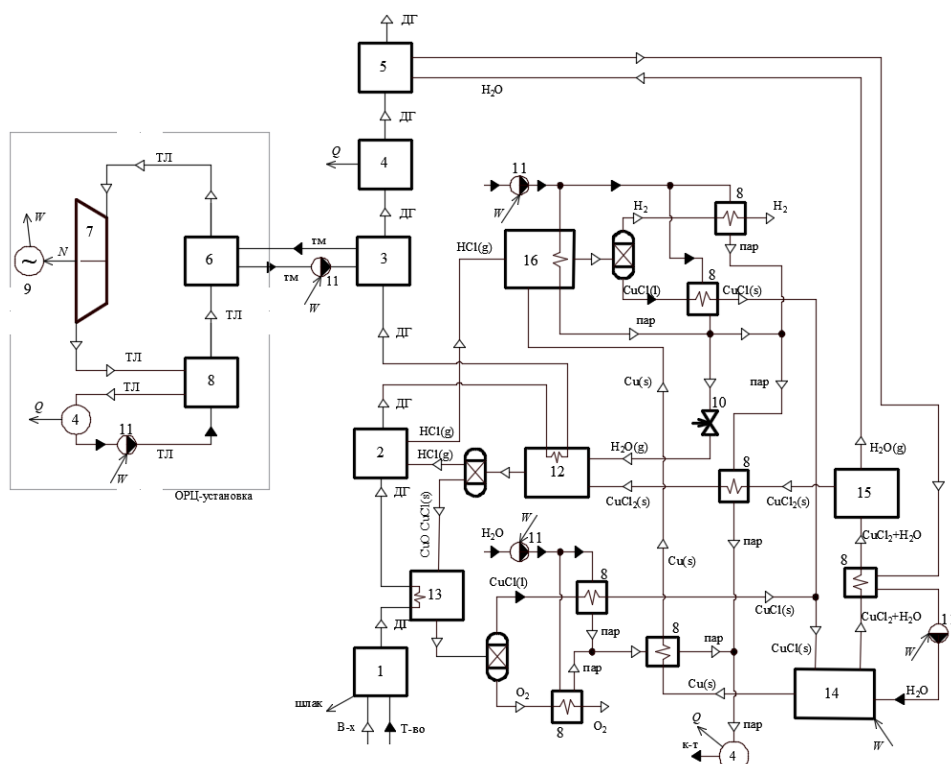


Рис. 2. Принципиальная схема мини-ТЭЦ на местных видах топлива с опцией производства водорода термохимическим методом Cu-Cl : В-х – воздух; Т-во – топливо; ДГ – дымовые газы; ТМ – термическое масло; ТЛ – толуол; Q – мощность отводимого теплового потока; W – мощность подводимой (отводимой) электрической энергии; 1 – топка котла; 2 – подогреватель HCl ; 3 – масляный подогреватель; 4 – подогреватель сетевой воды; 5 – подогреватель пара; 6 – испаритель; 7 – паровая турбина; 8 – регенеративный подогреватель; 9 – генератор; 10 – регулирующий клапан; 11 – насос; 12 – реактор гидролиза; 13 – реактор O_2 ; 14 – электролизер; 15 – струйная сушилка; 16 – реактор H_2

Fig. 2. Schematic diagram of a mini-CHP using local fuels with the option of producing H_2 by the Cu-Cl thermochemical method: B-x – air; T-vo – fuel; ДГ – flue gases; ТМ – thermal oil; ТЛ – silicone oil; Q – the power of the diverted heat flow; W – the power of the supplied (discharged) electrical energy; 1 – boiler furnace; 2 – HCl heater; 3 – thermal oil heater; 4 – mains water heater; 5 – vapor heater; 6 – vaporizer; 7 – steam turbine; 8 – regenerative heater; 9 – generator; 10 – control valve; 11 – pump; 12 – hydrolysis reactor; 13 – O_2 reactor; 14 – electrolyzer; 15 – jet air dryer; 16 – H_2 reactor

Моделируемая технологическая схема состоит из котлоагрегата, состоящего из топки 1, газохода реактора O_2 13, газохода подогревателя HCl 2,

термомасляного подогревателя 3 к контуру ОРЦ-установки, далее подогреватель сетевой воды 4 и подогреватель выпара 5. В рамках развития схемы стандартная схема с ОРЦ-модулем получила свое развитие путем включения в нее подсистемы производства водорода термохимическим методом $\text{Cu}-\text{Cl}$ с пятиступенчатым циклом. Таким образом, древесная щепа сжигается в топке 1, откуда продукты сгорания с температурой на уровне 800–950 °С направляются к реактору производства кислорода 13, где протекает эндотермическая реакция при температуре около 500 °С. Затем продукты сгорания поступают в поверхностный теплообменник HCl 2, где осуществляется нагрев паров HCl от 400 до 450 °С, после чего они поступают в реактор гидролиза, где протекает эндотермическая реакция при температуре 400–450 °С. Далее продукты сгорания из реактора гидролиза поступают в масляный подогреватель 3, где термомасло нагревается от 230 °С до 300 °С. Термическое масло используется как промежуточный теплоноситель в контуре: масляный подогреватель 3 и испаритель 6 ОРЦ-установки. Циркуляция масла обеспечивается циркуляционным насосом 11. Для повышения коэффициента использования топлива (КИТ) мини-ТЭЦ после масляного подогревателя 3 продукты сгорания поступают в сетевой подогреватель 4, где осуществляется нагрев сетевой воды по температурному графику 130/70 °С. Затем уходящие дымовые газы используются для нагрева водяного пара после струйной сушильной установки в подогревателе выпара 5 и выбрасываются в атмосферу.

В качестве рабочего тела в ОРЦ-цикле используется толуол. В испарителе 6 происходит его нагрев до температуры насыщения, равной 230 °С. Полученный пар давлением 12,5 бара направляется в паровую турбину 7 с относительным внутренним КПД, равным 87 %, где расширяется до давления 0,5 бара. После паровой турбины рабочее тело через регенератор 8 направляется в конденсатор 11. Конденсатор 11 ОРЦ-установки, благодаря достаточно высокой температуре рабочего тела, также служит подогревателем сетевой воды по температурному графику 130/70 °С. Толуол в состоянии насыщенной жидкости через питательный насос с относительным внутренним КПД 65 % подается в испаритель через регенератор. Температурный напор регенератора составляет 15 °С.

Как обозначалось ранее, в рассматриваемой схеме мини-ТЭЦ предусматривается пятиступенчатый термохимический цикл $\text{Cu}-\text{Cl}$ с максимальной температурой протекающих реакций, равной 500 °С. Первая ступень цикла протекает в реакторе гидролиза 12, куда подаются CuCl_2 в твердом состоянии с температурой 400 °С и пары воды с температурой 400 °С. Продуктами эндотермической реакции (1) являются пары HCl и твердое вещество $\text{CuO}\cdot\text{CuCl}_2$ при температуре 400 °С. $\text{CuO}\cdot\text{CuCl}_2$, полученный в реакции гидролиза, направляется в реактор производства кислорода 2, где происходит эндотермический процесс его разложения на O_2 и CuCl в состоянии расплавленной соли (реакция (2)). Согласно [10], оптимальной температурой реакции является 500 °С. Полученный кислород

охлаждается водой в рекуперативном подогревателе до 60 °С, а CuCl в регенеративном подогревателе охлаждается водой до температуры 25 °С. Полученная в процессе гидролиза соляная кислота с температурой 400 °С нагревается продуктами сгорания в рекуперативном подогревателе до 450 °С и направляется в реактор водорода, где протекает экзотермическая реакция (5) с выделением теплоты. Помимо HCl в реактор производства водорода подается твердая медь с температурой 450 °С. В результате реакции получают газообразный H₂ и CuCl в состоянии расплавленной соли с температурой 450 °С, которые охлаждаются водой в рекуперативных теплообменниках до температуры 60 °С и 25 °С соответственно. Охлаждение реактора производства водорода осуществляется водой. Часть пара, получаемая при охлаждении реактора производства водорода и продуктов реакции (5), направляется в реактор гидролиза 12. Остальная часть, в том числе и пар, полученный при охлаждении продуктов реакции, используется для нагрева CuCl₂, направляемого в реактор гидролиза от 110 до 400 °С. Теплота оставшегося пара низких параметров используется для нагрева сетевой воды.

Полученные в реакторе производства водорода и реакторе производства кислорода CuCl с температурой 25 °С направляются на электролиз (реакция (3)), катализатором которого является вода. Продуктами реакции электролиза являются твердая медь и водный раствор CuCl₂, который далее направляется на процесс сушки (реакция (4)) в струйной сушилке. Выпар из струйной сушилки нагревается потоком уходящих продуктов сгорания и используется для нагрева водного раствора CuCl₂. Получаемый таким образом CuCl₂ через рекуперативный подогреватель подается в реактор гидролиза 12. Твердая медь, являющаяся продуктом реакции электролиза, нагревается от 25 до 450 °С за счет теплоты охлаждения продуктов реакции производства кислорода и направляется в реактор получения водорода. Оставшаяся теплота охлаждения продуктов реакции кислорода и водорода используется для нагрева сетевой воды.

Математическая модель Aspen Hysys мини-ТЭЦ на местных видах топлива для производства водорода термохимическим методом

Так как в стандартной библиотеке *Aspen Hysys* отсутствуют термодинамические свойства ряда компонентов (CuCl, CuCl₂, Cu, CuO·CuCl₂), необходимых для создания модели термохимических реакций Cu–Cl, первым этапом создания расчетной модели являлось определение этих свойств по данным из программного комплекса *Aspen One*, литературы и экспериментальным данным, подробно приведенным в работе [14]. Для получения некоторых термодинамических свойств компонентов и реакций были использованы базы данных программного комплекса *HSC Chemistry* [15]. Термодинамические свойства веществ, использованных при построении модели и отсутствующие в стандартной библиотеке *Aspen Hysys*, приведены в табл. 2. При создании модели указанные выше компоненты были добавлены в программу как гипотетические (*Hypothetical Solid*). В качестве пакета свойств при моделировании химических реакций, теплообмена дымовых га-

зов, а также процессов, протекающих в ОРЦ-установке, был использован стандартный пакет *Peng-Robinson*. Для моделирования процессов теплообмена по стороне чистой воды был использован пакет *IAPWS-IF97*.

Таблица 2

Основные термохимические свойства
Main thermochemical properties

Свойство	Обозначение	CuO·CuCl ₂	CuCl ₂	CuCl	Cu
Молярная масса [14], кг/кмоль	M	214	134,452	98,999	63,546
Плотность при 25 °С [14, 15], кг/м ³	ρ	4080	3400	4140	8960
Теплота образования [10], кДж/моль	$\Delta_f H^0$	-381,3	-217,4	-137	0
Энтродия образования [14], Дж/(моль·К)	$\Delta_f S^0$	154,352	108,07	87,446	—
Свободная энергия образования Гиббса [14], кДж/моль	$\Delta_f G^0$	-369,7	-173,84	-119,4	—
Эксергия химического преобразования [14], кДж/моль	e_x^{ch}	21,08	82,474	75	—
Удельная теплоемкость в стандартных условиях [14, 15], кДж/(кмоль·К)	c_p^0	116,77	71,88	53,34	24,375

Помимо термодинамических параметров, представленных в табл. 2, для более корректного расчета теплообмена в промежуточных ступенях термохимических реакций для компонентов, отсутствующих в стандартной библиотеке *Husys*, по литературным источникам [14, 15] были определены зависимости удельной массовой теплоемкости веществ от температуры. Зависимость, используемая в *Aspen Husys*, представляет собой полином 4-й степени. Полученные при анализе литературных источников зависимости представлены на рис. 3.

Как отмечается в работе [11], одним из наиболее важных компонентов термохимических реакций Cu–Cl является CuCl, который встречается как в состоянии расплавленной соли, так и в состоянии твердого компонента. Вещество находится в твердом состоянии при температуре до 412 °С, а при нагревании до 423 °С происходит фазовый переход в жидкое состояние. Вместе с этим меняется характер кривой зависимости удельной теплоемкости элемента от температуры, что отчетливо видно на рис. 3.

В модели *Aspen Husys* изменение характера кривой реализовано путем добавления элементов *Stream Cutter* после реактора производства водорода (Фазовый переход 1) и реактора производства кислорода (Фазовый переход 2) соответственно.

На рис. 4 представлена построенная в *Aspen Husys* расчетная модель мини-ТЭЦ, работающая на МВТ, с включенной подсистемой производства водорода термохимическим методом Cu–Cl.

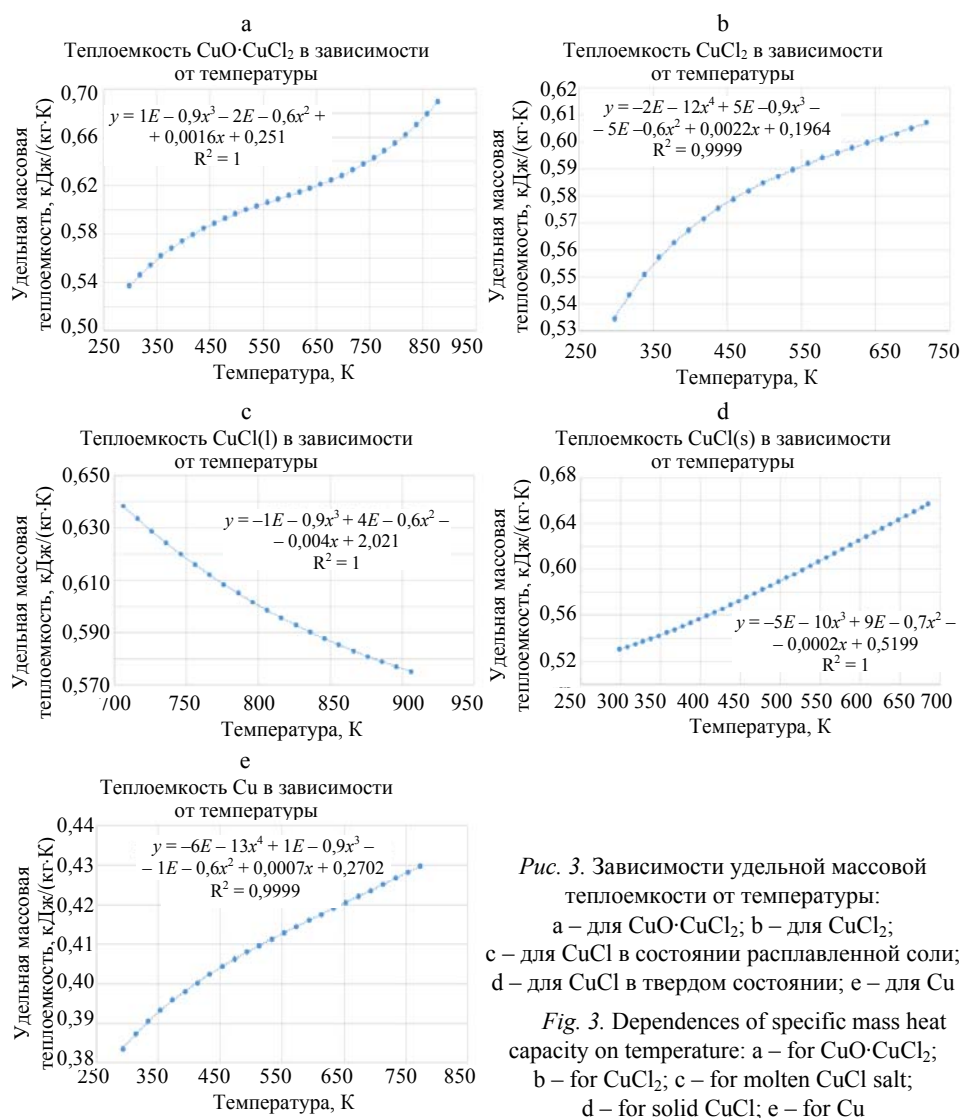


Рис. 3. Зависимости удельной массовой теплоемкости от температуры: а – для $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2$; б – для CuCl_2 ; с – для CuCl в состоянии расплавленной соли; d – для CuCl в твердом состоянии; e – для Cu

Fig. 3. Dependences of specific mass heat capacity on temperature: a – for $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2$; b – for CuCl_2 ; c – for molten CuCl salt; d – for solid CuCl ; e – for Cu

Так как основная задача данной работы не изучение кинетики протекающих реакций, а оценка целесообразности и эффективности схемы получения водорода на мини-ТЭЦ, работающих на МВТ, термохимическим методом, все химические реакции реализованы в модели в конверсионных реакторах со степенью конверсии 100 % при давлении 1 бар и с учетом определенных в работе [10] оптимальных параметров процессов.

Поскольку в программном комплексе *Aspen Hysys* нет возможности непосредственного моделирования процесса горения древесной щепы, состав продуктов сгорания был рассчитан в соответствии с [26] по исходному составу древесной щепы, используемой на существующей мини-ТЭЦ, при принятом коэффициенте избытка воздуха на горение, равном 1,4. Состав древесной щепы, полученных дымовых газов и низшая рабочая теплота сгорания топлива представлены в табл. 3.

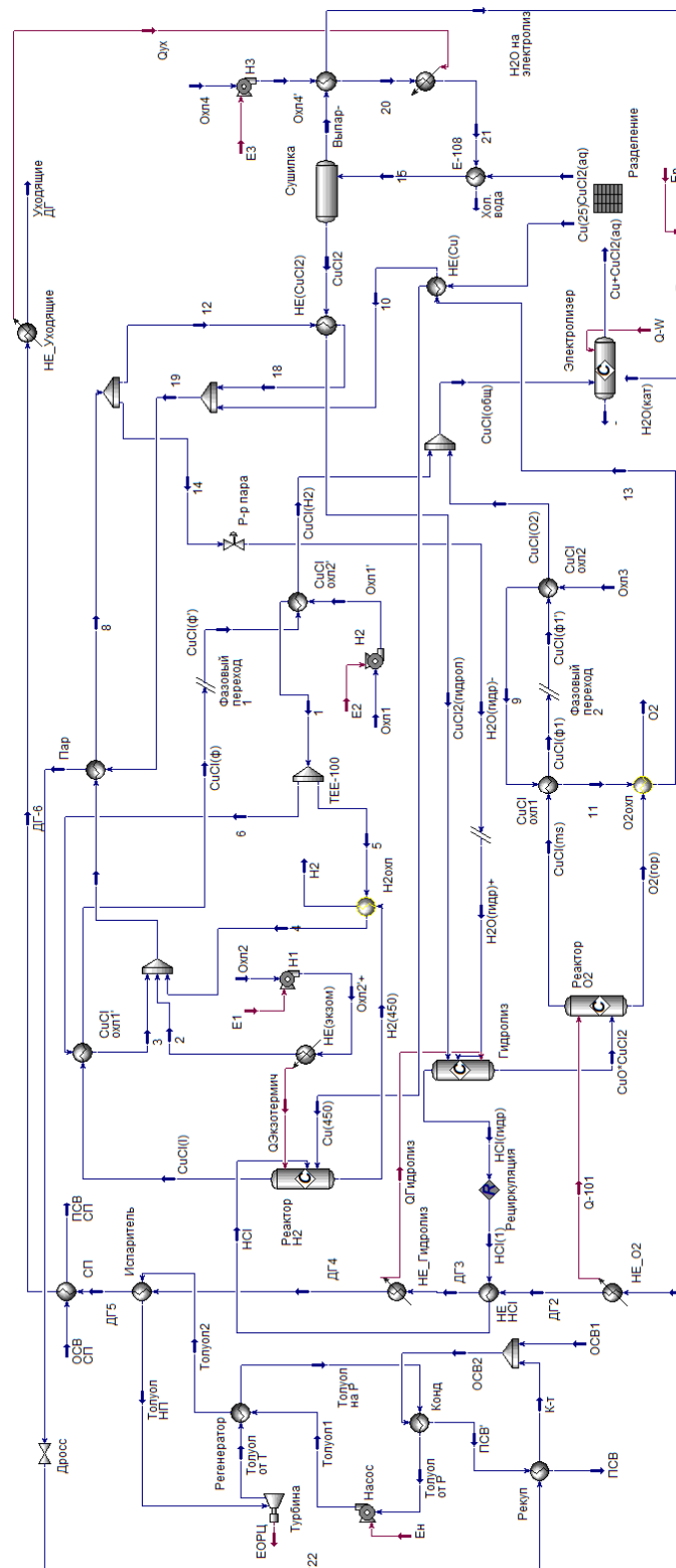


Рис. 4. Схема мини-ТЭЦ на местных видах топлива с опцией производства H_2 термохимическим методом Cu-Cl в Aspen Hysys
Fig. 4. Diagram of a mini-CHP using local fuels with the option of producing H_2 by the Cu-Cl thermochemical method in Aspen Hysys

Таблица 3

Состав древесной щепы и продуктов сгорания
Composition of wood chips and combustion products

Состав топлива, %	C ^p	O ^p	H ^p	N ^p	W ^p	Сумма
	29,7	26,46	3,78	0,06	40	100
Состав продуктов сгорания, % об.	N ₂	RO ₂	H ₂ O	O ₂		Сумма
	62,58	11,36	21,31	4,75		100
Низшая рабочая теплота сгорания, МДж/кг	10,081					

В программном комплексе *Aspen Hysys* невозможно напрямую смоделировать реакцию электролиза ввиду отсутствия соответствующего элемента моделирования. Поэтому для определения количества электрической энергии, необходимой для осуществления электролиза, использовалось уравнение Нернста

$$\Delta G = -nFE, \quad (1)$$

где n – число электронов, передающихся в электрохимической реакции; F – постоянная Фарадея (96454,56 Кл/моль); E – электродный потенциал, В.

Требуемое количество электрической энергии для осуществления термохимической реакции, согласно работе [21], определяется по формуле

$$W = -\Delta G. \quad (2)$$

В соответствии с [22, 23] на электрохимической стадии термохимического процесса значение электродного потенциала E при наличии мембраны в электролизере принимается 0,4 В. Однако в данной работе значение электродного потенциала реакции принято 0,34 В, что соответствует стандартному потенциалу меди [24] и лучше коррелирует с результатами, приведенными в работе [10].

Энергетический баланс термохимического процесса электролиза, в соответствии с работой [25], сводится к выражению

$$Q - W = \sum_P N_i [\Delta H_f^0 + H_i(T_P) - H_i^0] - \sum_R N_i [\Delta H_f^0 + H_i(T_R) - H_i^0], \quad (3)$$

где Q – тепловой эффект реакции, кВт; N_i – молярный расход соответственно исходных веществ и продуктов реакции, моль/с; ΔH_f^0 – теплота образования компонента при стандартных условиях, кДж/моль; $H_i(T) - H_i^0$ – изменение энтальпии каждого компонента реакции, кДж/моль (индексы P , R обозначают исходные вещества и продукты реакции).

В расчетной модели описанный выше способ определения потребляемой электрической энергии в процессе электролиза реализован при помощи блока *Spreadsheet*.

Анализ полученных результатов

На базе построенной математической модели была проанализирована энергетическая эффективность схемы мини-ТЭЦ на МВТ с опцией производства водорода термохимическим методом в пятиступенчатом цикле Cu–Cl. Основные результаты представлены в табл. 4. Расчет модели осуществлялся для двух вариантов: расчет схемы мини-ТЭЦ, работающей на МВТ, с опцией производства водорода для выработки одного кмоль водорода в час, и для реального аналога мини-ТЭЦ с установленной электрической мощностью ОРЦ-установки 1280 кВт. Для первого варианта электрическая мощность ОРЦ-установки подобрана так, чтобы удовлетворять потребность в электрической энергии на производство водорода и компенсировать потребности собственных нужд с минимальным избытком электрической энергии, отпускаемой в сеть, для второго варианта – это соотношение было выдержано автомодельно.

В работах [27, 28] приведены величины средних расходов электрической энергии на выработку 1 кг водорода для различных технологий электролиза. Так, для щелочного электролиза (АЕС) удельные затраты электрической энергии составляют 50–78 (кВт·ч)/кг, для технологии электролиза на протонообменной мембране (РЕМ) – 50–83 (кВт·ч)/кг, для технологии электролиза на твердых оксидах (SOEC) – 45–55 (кВт·ч)/кг. В предлагаемом варианте термохимического цикла Cu–Cl удельное потребление электроэнергии составит 9,11 (кВт·ч)/кг, что в среднем более чем в пять раз меньше затрат на электролиз по сравниваемым технологиям. В связи с этим можно говорить о целесообразности внедрения модуля производства водорода термохимическим методом Cu–Cl в схему мини-ТЭЦ, работающую на МВТ, тем более водород мы получаем на основе электроэнергии из возобновляемого источника энергии.

Таблица 4

Сводная таблица полученных результатов

Summary table of the results obtained

Вариант расчета	1	2
Расход древесной щепы, кг/ч	77,5	5100
Производство электрической энергии на ОРЦ-установке, кВт	20	1280
Электроэнергия на процесс производства водорода, кВт	18,22	1239
Производство тепловой энергии, кВт	111,7	7212
Расход воды на электролиз, кмоль/ч	1	68
Производство водорода, кмоль/ч	1	68
Производство кислорода, кмоль/ч	0,5	34
Удельное потребление электроэнергии на выработку 1 кг водорода, (кВт·ч)/кг	9,11	

Оценка энергетической эффективности схемы мини-ТЭЦ с опцией производства водорода термохимическим методом производится через КИТ, определенный по уравнению

$$\eta_{\text{и.т.}} = \frac{(E_{\text{ОРЦ}} - E_{\text{эл}} - E_{\text{СН}}) + Q_{\text{св}} + B_{\text{H}_2} Q_{\text{H}_2}^{\text{p}}}{B_{\text{т}} Q_{\text{H}}^{\text{p}}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{ОРЦ}}$ – электрическая мощность ОРЦ-установки, отдаваемая в сеть, кВт; $E_{\text{эл}}$ – электрическая мощность, потребляемая на процесс электролиза, кВт; $E_{\text{СН}}$ – электрическая мощность, потребляемая вспомогательным оборудованием, кВт; $Q_{\text{св}}$ – тепловая мощность на подогрев сетевой воды, кВт; B_{H_2} – расход полученного водорода, кг/с; $Q_{\text{H}_2}^{\text{p}}$ – низшая рабочая теплота сгорания водорода (согласно источнику [10], для чистого водорода составляет 120 МДж/кг), МДж/кг; $B_{\text{т}}$ – расход потребляемого мини-ТЭЦ топлива, кг/с; Q_{H}^{p} – низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

На рис. 5 представлены зависимость КИТ для схемы мини-ТЭЦ на МВТ с работающим модулем термохимического цикла производства водорода, определенный по (4), а также КИТ для стандартной схемы мини-ТЭЦ без него от температуры продуктов сгорания на выходе из топки. Максимальная величина КИТ в первом случае составила 83,1 %, во втором – 90,9 %.

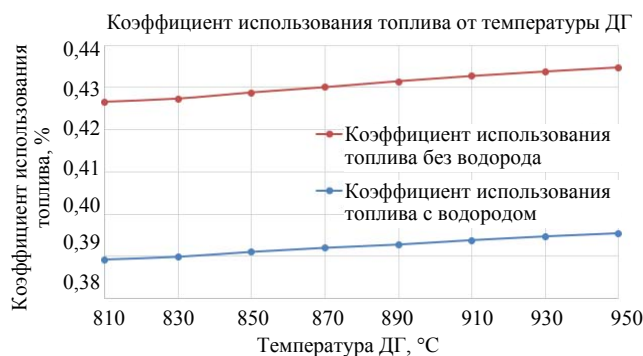


Рис. 5. Сравнение эффективности исследуемой системы мини-ТЭЦ с исходным аналогом

Fig. 5. Comparison of the efficiency of the mini-CHP system under study with the reference analog

На рис. 6 представлены структура КИТ обоих сравниваемых вариантов через тепловые и электрические абсолютные коэффициенты полезного действия (КПД), а также КПД генерации водорода для исследуемой схемы от температуры дымовых газов на выходе из топки котла.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что строительство мини-ТЭЦ, использующей в качестве топлива МВТ, с интегрированным модулем для постоянного производства водорода термохимическим способом, который в дальнейшем сжигается в чистом виде, способствует решению задач декарбонизации экономики, но энергетически менее эффективен, чем мини-ТЭЦ аналогичной мощности без модуля производства водорода. Однако данная технология может быть использована для балансирования графика потребления тепловой и электрической энергии в районе размещения электростанции.

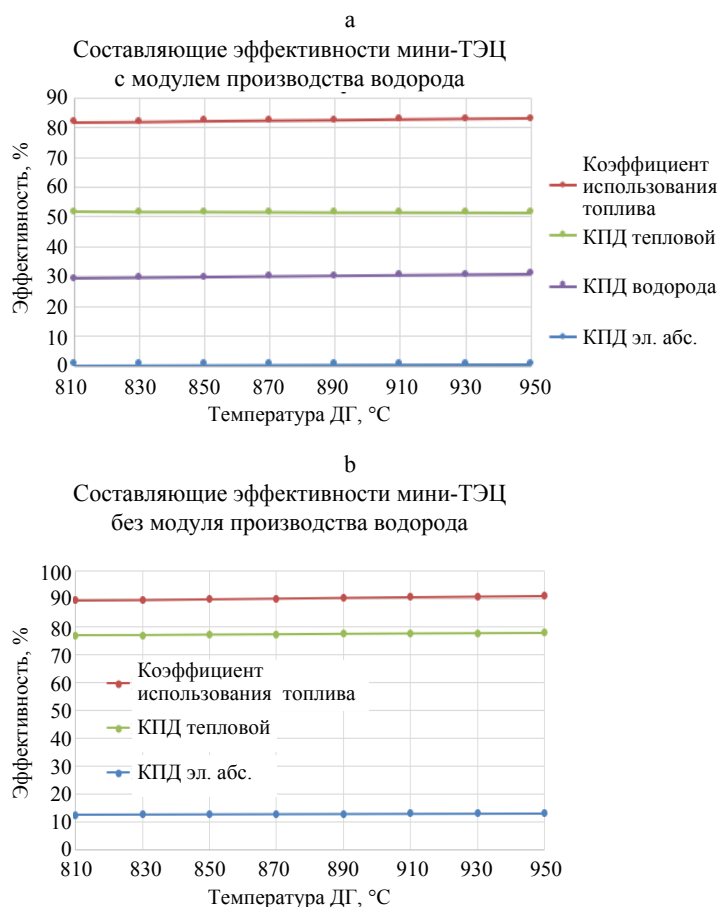


Рис. 6. Сравнение структур коэффициентов использования топлива для исследуемой системы мини-ТЭЦ и исходного аналога: а – составляющие энергетической эффективности в схеме с модулем производства водорода от температуры продуктов сгорания; б – составляющие энергетической эффективности в схеме без модуля производства водорода от температуры продуктов сгорания

Fig. 6. Comparison of the structures of the fuel utilization coefficients for the system of the mini-CHP under study and the reference analogue: а – components of energy efficiency in a scheme with a hydrogen production module on the temperature of combustion products; б – components of energy efficiency in the scheme without a hydrogen production module on the temperature of combustion products

Так, во время пиков графика потребления электрической энергии в энергосистеме мини-ТЭЦ может включать реверс электроэнергии из электросети, которая расходуется на производство водорода, при этом собственная выработка электроэнергии может регулироваться в диапазоне от 10 до 100 % установленной мощности практически без изменения эффективности ее выработки в зависимости от мощности потребляемого потока электроэнергии извне. Суточный баланс производства и потребления теплоты в этом случае необходимо осуществлять применением аккумуляторов теплоты.

Получаемый водород может быть накоплен и использован как для продажи, в том числе подачи в существующую газораспределительную сеть

природного газа в объеме до 10 % расхода последнего [5, 29], так и для собственных нужд непосредственного сжигания в газовых котлах или в транспортных, или стационарных топливных элементах. Наибольшая эффективность при внедрении технологии термохимического производства водорода на мини-ТЭЦ будет достигнута при наличии непосредственного потребителя водорода, благодаря более высокой эффективности производства водорода по сравнению с технологиями электролиза. Примерами потребителей водорода могут быть металлургические предприятия, как отмечалось в работе [20], либо предприятия химической промышленности. Поэтому следующим шагом по использованию водорода в собственных целях с решением экологической задачи является производство «зеленого» природного газа путем объединения представленной в статье технологии производства водорода и технологии извлечения диоксида углерода из дымовых газов мини-ТЭЦ на MBT [30].

Следует отметить, что успешная реализация разработанного технического решения во многом опирается на моделирование процессов тепломассопереноса и гидродинамики с помощью программного комплекса *Aspen Hysys*, что, несомненно, лежит в русле применения технологии цифровых двойников и актуально в рамках развития цифровой экономики в целом и при создании автоматизированных систем управления теплоснабжения в частности [31, 32].

ВЫВОДЫ

1. В ходе исследования синтезирована оригинальная принципиальная схема топливно-регенеративного цикла для мини-ТЭЦ с паросиловой ОРЦ-установкой, работающей на MBT и отличающейся включением в состав пятиступенчатого гибридного термохимического цикла медь-хлор Cu–Cl, что позволило получить дополнительную опцию – генерацию водорода с производительностью, соответствующей электрической мощности энергоблока. Для анализа эффективности данного технического решения разработана математическая модель на базе программного продукта *Aspen Hysys*. При построении модели были использованы основные термохимические свойства компонентов реакций гибридного термохимического цикла производства водорода Cu–Cl и термодинамические условия протекания термохимических реакций, приведенные в открытых литературных источниках.

2. Выполнено численное исследование и анализ энергетической эффективности топливно-регенеративного паросилового блока с циклом ОРЦ в зависимости от температуры продуктов сгорания MBT на выходе из топki, находящейся в диапазоне 850–950 °C для среднего состава древесной щепы влажностью 40–50 %. Полученные результаты позволяют утверждать, что общий коэффициент использования топлива для синтезированной схемы составляет $82,5 \pm 1$ % при тепловом КПД $51,5 \pm 1$ % и эффективности производства водорода по низшей теплоте сгорания 31 ± 2 %. Для справки: в исследованном диапазоне температур коэффициент использования топлива мини-ТЭЦ на MBT с циклом ОРЦ без модуля производства водорода составляет 89,3–90,9 %, а электрический КПД – 13 %. Удельный расход электрической энергии генерации водорода у топливно-

регенеративного паросилового энергоблока ОРЦ мини-ТЭЦ на МВТ по результатам численного анализа составляет $9,1 \pm 0,1$ (кВт·ч)/кг, что более чем в пять раз меньше, чем для установок на основе технологий щелочного электролиза, электролиза на протонообменной мембране и электролиза на твердых оксидах.

3. Ввиду перспективности применения представленного метода производства водорода дальнейшее исследование предполагает изучение гибкости топливно-регенеративного паросилового энергоблока на МВТ с циклом ОРЦ в условиях работы в энергосистеме и возможности ее функционирования в соответствии с требованиями тепловых потребителей и электрического графика нагрузок энергосистемы, в том числе с использованием реверса электроэнергии в часы максимумов и минимумов суточных графиков потребления электроэнергии. Дальнейшее исследование предполагает также последующее изучение технологии производства «зеленого» природного газа для мини-ТЭЦ на МВТ путем метанирования полученного в термохимическом цикле водорода, а также рассмотрение отличительных особенностей работы топливно-регенеративного паросилового блока с циклом ОРЦ на фрезерном топливе и при утилизации органических, промышленных и бытовых отходов.

Данная работа частично выполнена в рамках совместного научного проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства инновационного развития Республики Узбекистан «БРФФИ–МИРРУ-2022» (Договор T22УЗБ-052).

ЛИТЕРАТУРА

1. Парижское климатическое соглашение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/>. Дата доступа: 09.11.2022.
2. Maradin, D. Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources Utilization / D. Maradin // International Journal of Energy Economics and Policy. 2021. Vol. 11, № 3. P. 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijee.11027>.
3. A review of Four Case Studies Assessing the Potential for Hydrogen Penetration of the Future Energy System / A. Chapman [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, № 13. С. 6371–6382. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.168>.
4. Hydrogen and the Decarbonization of the Energy System in Europe in 2050: A detailed Model-Based Analysis / G. S. Seck [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 167. P. 112779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779>.
5. Место водорода в современных энерготехнологических метасистемах. Ч. 3. Водород в качестве топлива для энергетических систем / В. А. Седнин [и др.] // Энергоэффективность. 2021. № 5. С. 16–21.
6. Седнин, В. А. Прогнозная оценка себестоимости водорода в разрезе различных технологий производства / В. А. Седнин, А. А. Абрамовский // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Киев, 2021. С. 190–194.
7. Аминов, Р. З. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями / Р. З. Аминов, А. Н. Байрамов. М.: Наука, 2016. 254 с.
8. Rosen, M. A. Advances in Hydrogen Production by Thermochemical Water Decomposition: A Review / M. A. Rosen // Energy. 2010. Vol. 35 № 2, 1068–1076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.018>.
9. Романюк, В. Н. К вопросу о диверсификации вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. 2015. № 6 (87). С. 3–7.
10. Orhan, M. F. Process Simulation and Analysis of a Five - Step Copper – Chlorine Thermochemical Water Decomposition Cycle for Sustainable Hydrogen Production / M. F. Orhan,

- I. Dincer, M. A. Rosen // *International Journal of Energy Research*. 2014. Vol. 38, Iss. 11. P. 1391–1402. <https://doi.org/10.1002/er.3148>.
11. Nuclear-Based Hydrogen Production with a Thermochemical Copper-Chlorine Cycle and Supercritical Water Reactor: Equipment Scale-Up and Process Simulation / M. A. Rosen [et al.] // *International Journal of Energy Research*. 2010. Vol. 36(4), P. 456–465. <https://doi.org/10.1002/er.1702.3>.
12. Жизнин, С. З. Экономические аспекты развития ядерно-водородной энергетики в мире и в России / С. З. Жизнин, В. М. Тимохов // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. 2020. № 1–6. С. 40–59.
13. Лесной фонд [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/>. Дата доступа: 31.10.2022.
14. Zamfirescu, C. Thermophysical Properties of Copper Compounds in Copper–Chlorine Thermochemical Water Splitting Cycles / C. Zamfirescu, I. Dincer, G. F. Naterer // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. № 10. P. 4839–4852. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.101>.
15. HSC Chemistry Software [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.mogroup.com/portfolio/hsc-chemistry>. Date of access: 12.12.2022.
16. Safari, F. A Review and Comparative Evaluation of Thermochemical Water Splitting Cycles for Hydrogen Production / F. Safari, I. Dincer // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 205. C. 112182. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112182>.
17. Recent Canadian Advances in Nuclear-Based Hydrogen Production and the Thermochemical Cu–Cl Cycle / G. Naterer [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, Iss. 7. P. 2901–2917. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.090>.
18. Future Hydrogen Production Using Nuclear Reactors / R. R. Sadhankar [et al.] // 2006 IEEE EIC Climate Change Conference. IEEE, 2006. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/EICCCC.2006.277205>.
19. Sadhankar, R. R. Leveraging Nuclear Research to Support Hydrogen Economy / R. R. Sadhankar // *International Journal of Energy Research*. 2007. Vol. 31, No 12. P. 1131–1141. <https://doi.org/10.1002/er.1324>.
20. Энерготехнологическая установка на базе нагревательной печи прокатного стана с опцией производства водорода / В. А. Седнин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 2. С. 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142>.
21. Balta, M. T. Energy and Exergy Analyses of Magnesium-Chlorine (Mg-Cl) Thermochemical Cycle / M. T. Balta, I. Dincer, A. Hepbasli // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37, No 6. P. 4855–4862. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.044>.
22. Lewis, M. A. Evaluation of Alternative Thermochemical Cycles, Part I: The Methodology / M. A. Lewis, J. G. Masin, P. A. O'Hare // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, No 9. P. 4115–4124. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.045>.
23. High efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Solar Thermo-chemical Splitting of Water (Solar Thermo-Chemical Splitting for H₂) [Electronic Resource]: Annual Report for the Period October 1, 2003 through September 30, 2004: GA-A24972 / B. W. McQuillan [et al.]. General Atomics, 2010. Mode of access: <https://kurl.ru/zjoIW>.
24. Иванов, М. Г. Свойства металлов [Электронный ресурс] / М. Г. Иванов, А. В. Нечаев. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2274742/svojstva-metallov-m-g-ivanov%E2%80%9494a.v.-nechaev-uchebnoe-e-lektr>.
25. Engineering Process Model for High-Temperature Steam Electrolysis System Performance Evaluation [Electronic Resource]: AIChE 2005 Annual Meeting / Stoots C. M. [et al.]. Idaho National Laboratory, 2005. Mode of access: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc886919/>.
26. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / под ред. Н. В. Кузнецова [и др.]. М.: Энергия, 1973. 296 с.
27. Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 C Climate Goal [Electronic Resource]. 2020. Mode of access: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
28. Water Electrolysis: From Textbook Knowledge to the Latest Scientific Strategies and Industrial Developments / M. Chatenet [et al.] // *Chemical Society Reviews*. 2022. Vol. 51, No 11. P. 4583–4762. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>.
29. Sednin, V. A. Analysis of Hydrogen Use in Gas Turbine Plants / V. A. Sednin, A. V. Sednin, A. A. Matsyavin. *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Vol. 66, № 2, 158–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-158-168>.

30. 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. Т. 65, № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.
31. Седнин, В. А. Интеграционные тенденции в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, А. В. Седнин // Энергоэффективность. 2021. № 6. С. 23–27.
32. Sednin, A. V. An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System / A. V. Sednin, A. V. Zherelo // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. Р. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.

Поступила 10.11.2022 Подписана в печать 11.01.2023 Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. *Paris Climate Agreement*. Available at: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru> (accessed 09 November 2022) (in Russian).
2. Maradin D. (2021) Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources. *Utilization. International Journal of Energy Economics and Policy*, 11 (3), 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijeep.11027>.
3. Chapman A., Itaoka K., Hirose K., Davidson F. T., Nagasawa K., Lloyd A. C. [et al.] (2019) A Review of Four Case Studies Assessing the Potential for Hydrogen Penetration of the Future Energy System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (13), 6371–6382. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.168>.
4. Seck G. S., Hache E., Sabathier J., Guedes F., Reigstad G. A., Straus J. [et al.] (2022) Hydrogen and the Decarbonization of the Energy System in Europe in 2050: A Detailed Model-Based Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779>.
5. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Kuz'mich K. A., Ivanchikov E. O. (2021) The Role of Hydrogen in Modern Energy Technological Metasystems. Part 3. Hydrogen as a Fuel for Energy Systems. *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], (5), 16–21 (in Russian).
6. Sednin V. A., Abrazovsky A. A. (2021) Predictive Estimation of the Cost of Hydrogen in the Context of Various Production Technologies. *Problemy Ekologii i Ekspluatatsii Ob'ektov Energetiki* [Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities]. Kyiv, 190–194 (in Russian).
7. Aminov R. Z., Bayramov A. N. (2016) *Combining Hydrogen Energy Cycles with Nuclear Power Plants*. Moscow, Nauka Publ. 254 (in Russian).
8. Rosen M. A. (2010) Advances in Hydrogen Production by Thermochemical Water Decomposition: A Review. *Energy*, 35 (2), 1068–1076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.018>.
9. Romanyuk V. N., Babich A. A. (2015) On the Issue of Diversification of Options for Regulating the Generation Capacity of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (6), 3–7 (In Russian).
10. Orhan M. F., Dincer I., Rosen M. A. (2014) Process Simulation and Analysis of a Five - Step Copper – Chlorine Thermochemical Water Decomposition Cycle for Sustainable Hydrogen Production. *International Journal of Energy Research*, 38 (11), 1391–1402. <https://doi.org/10.1002/er.3148>.
11. Rosen M. A., Naterer G. F., Chukwu C. C. Sadhankar R., Suppiah S. (2010) Nuclear-Based Hydrogen Production with a Thermochemical Copper-Chlorine Cycle and Supercritical Water Reactor: Equipment Scale-Up and Process Simulation. *International Journal of Energy Research*, 36 (4), 456–465. <https://doi.org/10.1002/er.1702.3>.
12. Zhiznin S. Z., Timokhov V. M. (2020) Economic Aspects of Nuclear and Hydrogen Energy Development in the World and Russia. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, (1–6), 40–59 (in Russian).
13. *Forest Fund*. Available at: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests> (accessed 31 October 2022) (in Russian).
14. Zamfirescu C., Dincer I., Naterer G. F. (2010) Thermophysical Properties of Copper Compounds in Copper–Chlorine Thermochemical Water Splitting Cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (10), 4839–4852. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.101>.
15. *HSC Chemistrytm Software*. Available at: <https://www.mogroup.com/portfolio/hsc-chemistry>. (accessed 12 December 2022).

16. Safari F., Dincer I. (2020) A Review and Comparative Evaluation of Thermochemical Water Splitting Cycles for Hydrogen Production. *Energy Conversion and Management*, 205, 112182. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112182>.
17. Naterer G., Suppiah S., Lewis M., Gabriel K., Dincer I., Rosen M. A. [et al.] (2009) Recent Canadian Advances in Nuclear-Based Hydrogen Production and the Thermochemical Cu–Cl Cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (7), 2901–2917. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.090>.
18. Sadhankar R. R., Li J., Li H., Ryland D. K., Suppiah S. (2006) Future Hydrogen Production Using Nuclear Reactors. *2006 IEEE EIC Climate Change Conference*. IEEE, 1–9. <https://doi.org/10.1109/EICCCC.2006.277205>.
19. Sadhankar R. R. (2007) Leveraging Nuclear Research to Support Hydrogen Economy. *International Journal of Energy Research*, 31 (12), 1131–1141. <https://doi.org/10.1002/er.1324>.
20. Sednin V. A., Ivanchikov E. O., Kaliy V. A., Martinchuk A. Y. (2022) Energy-and-Technology Installation Based on a Rolling Mill Heating Furnace with the Option of Hydrogen Production. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142> (in Russian).
21. Balta M. T., Dincer I., Hepbasli A. (2012) Energy and Exergy Analyses of Magnesium-Chlorine (Mg-Cl) Thermochemical Cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (6), 4855–4862. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.044>.
22. Lewis M. A., Masin J. G., O'Hare P. A. (2009) Evaluation of Alternative Thermochemical Cycles, Part I: The Methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (9), 4115–4124. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.045>.
23. McQuillan B. W., Brown L. C., Besenbruch G. E., Tolman R., Cramer T., Russ B. E. [et al.] (2010) *High efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Solar Thermo-Chemical Splitting of Water (Solar Thermo-Chemical Splitting for H₂)*. Annual Report for the Period October 1, 2003 Through September 30, 2004: GA-A24972. General Atomics. Available at: <https://kurl.ru/zjoIW>.
24. Ivanov M. G., Nechaev A. V. (2014) *Properties of Metals*. Yekaterinburg, Ural University Publ. Available at: <https://studylib.ru/doc/2274742/svoystva-metallov-m.g.-ivanov%E2%80%9494a.v.-nechaev-uchebnoe-e-lektr> (in Russian).
25. Stoots C. M., O'Brien J. E., McKellar M. G., Hawkes G. L. (2005) *Engineering Process Model for High-Temperature Steam Electrolysis System Performance Evaluation: AIChE 2005 Annual Meeting*. Idaho National Laboratory. Available at: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc886919/>.
26. Kuznetsov N. V., Mitor V. V., Dubovskii I. E., Karasina E. S., Rubin M. M., Blokh A. G. [et al.] (1973) *Thermal Calculation of Boiler Units (Normative Method)*. Moscow, Energiya Publ. 296 (in Russian).
27. *Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 C Climate Goal* (2020). Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
28. Chatenet M., Pollet B. G., Dekel D. R., Dionigi F., Deseure J., Millet P. (2022) Water Electrolysis: From Textbook Knowledge to the Latest Scientific Strategies and Industrial Developments. *Chemical Society Reviews*, 51 (11), 4583–4762. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>.
29. Sednin V. A., Sednin A. V., Matsyavin A. A. (2023) Analysis of Hydrogen Use in Gas Turbine Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (2), 158–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-158-168>.
30. 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).
31. Sednin V. A., Sednin A. V. (2021) Integration Trends in Heat Supply Systems. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (6), 23–27 (in Russian).
32. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-374-386>

УДК 662.711.4

Исследование тепло- и массообмена в процессе топливоподготовки частицы биомассы с высокой влажностью

А. В. Митрофанов^{1, 2)}, О. Б. Колибаба¹⁾, Р. Н. Габитов¹⁾, Д. А. Долинин¹⁾,
С. В. Василевич³⁾

¹⁾Ивановский государственный энергетический университет
(Иваново, Российская Федерация)

²⁾Торайгыров университет (Павлодар, Республика Казахстан)

³⁾Белорусская государственная академия авиации (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В настоящее время актуальной задачей развития топливно-энергетических комплексов ряда стран является увеличение доли генерации за счет вовлечения в оборот твердого топлива. В ряду подобных проектов особенно значимыми являются те, которые позволяют утилизировать отходы различных производств. Пищевые продукты с истекшим сроком годности в таком контексте представляются возобновляемым местным энергетическим ресурсом. Однако такие продукты требуют серьезных мероприятий по их подготовке к сжиганию или другому виду высокотемпературной переработки с целью получения энергии. Целью настоящей работы является совершенствование методов подготовки топлива из утилизируемых плодов моркови (непригодных для использования в пищевой сфере). При топливоподготовке моркови стадия сушки является лимитирующей для рациональной организации ее переработки в котлоагрегатах. Кроме того, стадия сушки является крайне энергозатратной, поэтому надежное прогнозирование ее кинетики во многом определяет эффективность всего технологического процесса. В ходе исследования решены следующие задачи: разработан численный метод описания процессов внутренней и внешней задач тепломассообмена с использованием явной разностной аппроксимации дифференциальных уравнений тепломассопереноса; выполнена параметрическая идентификация предложенной одномерной математической модели с использованием известных из литературных источников эмпирических зависимостей; проведена эмпирическая проверка предложенной математической модели путем сравнения получаемых расчетных прогнозов с результатами собственных натурных экспериментов. Тот факт, что предложенная математическая модель и результаты натурного эксперимента являются независимыми, при этом расчетные прогнозы и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии, позволяет рассматривать предложенный метод расчета как достоверную научную основу для компьютерного метода расчета тепломассообменных процессов при организации приготовления топлива из плодов моркови.

Ключевые слова: топливоподготовка, морковь, возобновляемое топливо, сушка, численное моделирование, явная разностная аппроксимация, тепломассоперенос, инженерный метод расчета, отходы биомассы

Для цитирования: Исследование тепло- и массообмена в процессе топливоподготовки частицы биомассы с высокой влажностью/ А. В. Митрофанов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 374–386. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-374-386>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Siarhei V.
Belarusian State Academy of Aviation
77, Ubovich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Fuel Preparation from Biomass Particles with High Moisture

A. V. Mitrofanov^{1,2)}, O. B. Kolibaba¹⁾, R. N. Gabitov¹⁾, D. A. Dolinin¹⁾,
S. V. Vasilevich³⁾

¹⁾ Ivanovo State Power Engineering University (Ivanovo, Russian Federation)

²⁾ Toraighyrov university (Pavlodar, Republic of Kazakhstan)

³⁾ Belarusian State Academy of Aviation (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently, in a number of countries an urgent task for development of fuel and energy complexes is to increase the share of generation by involving solid fuels in circulation. Among such projects, those that allow the disposal of waste from various industries are particularly significant. Expired food products in this context are represented as a renewable local energy resource. However, such products require serious activities to prepare them for incineration or other type of high-temperature processing in order to obtain energy. The purpose of the present work is to improve methods of preparing fuel from recycled carrot fruits (unsuitable for use in the food sector). During the fuel preparation of carrots, the drying stage is limiting for the rational organization of its processing in boilers. In addition, the drying stage is extremely energy-consuming, so reliable prediction of its kinetics largely determines the efficiency of the entire technological process. In the course of the study, the following tasks were solved: a numerical method was developed for describing the processes of internal and external heat and mass transfer problems using an explicit difference approximation of differential equations of heat and mass transfer; parametric identification of the proposed one-dimensional mathematical model was performed using empirical dependencies known from literature sources; empirical verification of the proposed mathematical model was carried out by comparing the calculated forecasts obtained with the results of their own field experiments. The fact that the proposed mathematical model and the results of the full-scale experiment are independent, while the calculated forecasts and experimental data are in good agreement, makes us possible to consider the proposed calculation method as a reliable scientific basis for a computer method for calculating of heat and mass transfer processes when organizing the preparation of fuel from carrot fruits.

Keywords: fuel preparation, carrots, renewable fuel, drying, numerical modeling, explicit difference approximation, heat and mass transfer, engineering calculation method, biomass waste

For citation: Mitrofanov A. V., Kolibaba O. B., Gabitov R. N., Dolinin D. A., Vasilevich S. V. (2023) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Fuel Preparation from Biomass Particles with High Moisture. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 374–386. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-374-386> (in Russian)

Введение

В настоящее время тенденции развития топливно-энергетических комплексов ряда стран, в том числе России и Беларуси, предполагают увеличение генерации электроэнергии за счет вовлечения в оборот различных видов возобновляемого твердого топлива [1–3]. Указанные тенденции поддерживаются также существованием объективно острых задач по утилизации отходов и побочных продуктов других отраслей материального производства [4–6]. Примером такой задачи может служить необходимость поиска эффективных способов переработки пищевых продуктов, срок годности которых истек [6]. Однако следует иметь в виду, что, например, овощи и фрукты не подходят для непосредственного производства энергии

ввиду высокого содержания влаги [6, 7]. Для термохимической переработки биомассы рекомендуемая влажность сырья должна быть сведена к минимуму. Как правило, содержание влаги в сырой биомассе колеблется от 50 до 85 %, для эффективной же организации процесса пиролиза требуется сушка до значений влажности 12–15 % и менее [6, 7].

При этом важной особенностью обезвоживания негодных для использования овощей и фруктов является то, что рассмотрение перерабатываемых частиц как термически тонких тел часто является грубым допущением и, соответственно, эволюция полей температуры и влагосодержания в одиночной частице является критически важной не только с точки зрения расчета обезвоживания частицы, но и с точки зрения построения прогностически эффективной модели функционирования сушильного оборудования [8, 9]. Иногда исследователи ограничиваются решением только «внешней» задачи, полагая, что частицы материала можно рассмотреть в качестве термически тонких тел [10, 11], однако это всегда требует обоснования, так как тепломассоперенос в телах нередко сопровождается углублением зоны испарения, поэтому необходима классификация материалов как объектов сушки с учетом термических, тепломассообменных, структурно-механических и других характеристик [11–13]. В контексте данной работы представляется наиболее информативной классификация дисперсных материалов с учетом величины диффузионного критерия Био (Bi_d), значение которого определяет тип технологической задачи (до $Bi_d \leq 0,1$ – внешняя задача, до $Bi_d = 20$ – смешанная задача, $Bi_d > 20$ – внутренняя задача массообмена) [13].

Предлагаемое в настоящей работе исследование направлено на построение простой, но информативной модели миграции теплоты и влаги в цилиндрической частице моркови, которая может служить достоверной научной основой для формирования инженерного метода расчета аппаратуры для переработки биомассы в топливо, пригодное для дальнейшего энерготехнологического использования.

Методы и результаты исследования

Методы расчетного исследования. При построении математической модели процессов переноса, которые реализуются как внутри рассматриваемой фазы, так и между фазами, необходимы неизбежные упрощения. Расчетная схема моделирования процессов теплопереноса представлена на рис. 1. Исследуемый образец рассматривается как цилиндр, состоящий из заданного числа n цилиндрических элементарных слоев толщиной Δr каждый. Внутри любого такого элемента все характеристики полагаются одинаковыми. Соседние цилиндрические элементы в результате процессов переноса обмениваются порциями теплоты и массы. При этом обмен указанными аддитивными свойствами осуществляется через соответствующие цилиндрические поверхности (нумерация этих поверхностей

на рис. 1 не приведена, но номер внешней цилиндрической поверхности совпадает с номером ячейки, которую она ограничивает). Математическая формализация описания процесса теплопереноса в основных положениях совпадает со схемой, предложенной в работе [9], однако она дополнена потоками теплоты, связанными с мигрирующей влагой. Математические построения выполнены в рамках алгоритмического описания процессов, то есть модель явления представляется как набор из повторяющихся последовательно дискретных расчетных шагов [14].

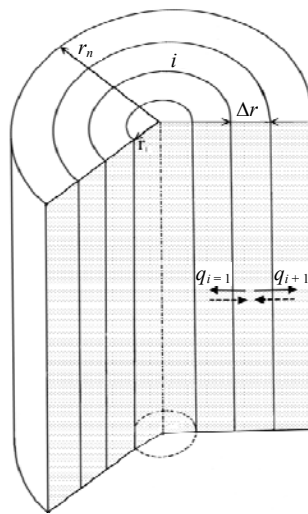


Рис. 1. Расчетная схема моделирования радиального переноса теплоты в цилиндрической частице

Fig. 1. The calculation scheme of the radial heat transfer model in a cylindrical particle

Эволюция состояния частицы наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода; k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени).

Тепловое состояние частицы характеризуется вектором-столбцом $Q = \{Q_i\}$, который имеет размерность $n \times 1$. Любой (i -й) элемент этого вектора – это количество теплоты, содержащейся в соответствующем цилиндрическом слое. Далее цилиндрические слои будем считать представительным объемом рассматриваемого объекта.

Тепловое состояние i -го представительного объема изменяется с учетом кондуктивных потоков теплоты из соседних слоев с номерами $(i + 1)$ и $(i - 1)$, которые могут обмениваться рассматриваемым объемом порциями теплоты q_{i-1} и q_{i+1} :

$$q_{i-1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i-1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_{i-1} L) \Delta t \text{ для } i = \overline{2, n}; \quad (1)$$

$$q_{i+1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i+1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_i L) \Delta t \text{ для } i = \overline{1, n-1}, \quad (2)$$

где T_i – элемент вектора температур материала $\mathbf{T} = \{T_i\}$ в представительных объемах (имеет размерность $n \times 1$); L – высота цилиндрической частицы.

Помимо кондуктивного распространения теплоты внутри частицы на тепловое состояние также оказывает влияние массоперенос влаги между ячейками. Для моделирования внутренней диффузии влаги в радиальном направлении цилиндра использован расчетный подход, основанный на применении математического аппарата теории цепей Маркова [10, 11]. Текущее распределение массы влаги по ячейкам характеризуется вектором $\mathbf{M} = \{M_i\}$. Изменение вектора $\mathbf{M}$ описывается рекуррентным матричным равенством вида

$$\mathbf{M}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{M}^k, \quad (3)$$

где $\mathbf{P}$ – матрица переходных вероятностей. Квадратная матрица $\mathbf{P}$ содержит вероятности диффузионного переноса влаги, которые расположены симметрично относительно главной диагонали. Так, например, для частицы, представляемой набором из четырех слоев, матрица переходных вероятностей будет иметь вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & 0 \\ 0 & d & 1-2d & d \\ 0 & 0 & d & 1-d \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Каждый столбец такой матрицы заполнен вероятностями переноса влаги из соответствующей ячейки (сумма вероятностей в столбце равна 1).

Идентификация вероятностей диффузионного переноса d выполняется через установление связи между этой вероятностью и эффективным коэффициентом диффузии влаги D

$$d = D \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2}. \quad (5)$$

Коэффициент диффузии влаги рассчитывается по известным [15] эмпирическим соотношениям, но отдельно для каждого представительного объема:

$$D_i = 2,779 \cdot 10^{-4} \cdot \exp \left(-0,97 - \frac{3459,8}{T_i} + 0,059 \cdot \frac{M_i}{m_i} \right), \quad (6)$$

где M_i/m_i – влагосодержание материала в i -м цилиндрическом слое, кг влаги/кг сухого вещества; m_i – масса сухого вещества в представительном

объеме. Распределение содержания влаги в образце характеризуется массивом $X = \{x_i\}$.

Миграция влаги влечет за собой перераспределение теплоты. Содержание теплоты, заключенной в диффундирующей влаге, характеризуется вектором $Q_w = \{Q_{wi}\}$. Изменение во времени этого вектора описывается по аналогии с выражением (3):

$$Q_w^{k+1} = PQ_w^k. \quad (7)$$

Таким образом, зависимости (1), (2) определяют кондуктивное распространение теплоты в радиальном направлении образца, а выражения (3)–(7) определяют перенос теплоты за счет миграции влаги внутри тела.

Межфазное взаимодействие между образцом и сушильным агентом осуществляется через его наружную поверхность. Интенсивность межфазного теплообмена в общем случае зависит от характера распределения полей скоростей и температур потока в пространстве сушильного оборудования, для описания которых необходимы специальные модели [9–11]. Однако в настоящей работе рассматривается упрощенная ситуация, когда теплофизические свойства сушильного агента и параметры потока могут считаться постоянными. Определяемые критерии теплообмена в таком случае тоже будут иметь постоянные значения, для оценки которых используются известные соотношения [16]:

$$Nu = C Re^y Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля, Pr_w – критерий Прандтля, в котором кинематическая вязкость и температуропроводность берутся при температуре стенки обтекаемого потоком цилиндра, а не при температуре потока. Эмпирические параметры C и y принимаются в зависимости от режима течения: $C = 0,50$ и $y = 0,50$ при $5 < Re < 1000$; $C = 0,25$ и $y = 0,60$ при $1000 < Re < 200000$; $C = 0,023$ и $y = 0,80$ при $30000 < Re < 2000000$ [16].

Для оценки числа Шервуда Sh используется следующее опытное соотношение [17]:

$$Sh = 1,1 \cdot \varepsilon Re^{0,28} Sc^{1/3}, \quad (9)$$

где ε – порозность слоя (в данном случае $\varepsilon = 1$); Sc – критерий Шмидта.

Искомые коэффициенты теплообмена α и массообмена β рассчитываются как [16]:

$$\alpha = Nu\lambda/(2r_n), \quad (10)$$

$$\beta = ShD/(2r_n). \quad (11)$$

Таким образом, количество теплоты q_s , отдаваемое частицей за счет теплоотдачи за один рекуррентный расчетный шаг, может быть определено по формуле

$$q_s^k = -\alpha(T_n^k - T_g)(2\pi r_n L) \frac{\Delta t}{dr}, \quad (12)$$

где T_g – температура сушильного агента (принята постоянной); T_n^k – температура материала (нижний индекс обозначает номер представительного слоя, верхний индекс показывает номер шага по времени).

Количество влаги Δm , отдаваемое частицей за время Δt через наружную поверхность, определяется как

$$\Delta m^k = -\beta(p_{ws}^k - p_{wg}^k)(2\pi r_n L) \frac{\Delta t}{dr}, \quad (13)$$

где p_{ws} и p_{wg} – парциальные давления влаги на поверхности частицы и в воздухе (рассчитываются по эмпирическим соотношениям, которые также были использованы в наших предыдущих работах [11]).

Тепловое состояние всех ячеек может быть описано следующими балансовыми соотношениями:

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_{i+1}^k + Q_{wi}^k \text{ для } i = \overline{2, (n-1)}; \quad (14)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i+1}^k + Q_{wi}^k \text{ для } i = 1; \quad (15)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + Q_{wi}^k - q_s^k - r_w \Delta m^k \text{ для } i = n, \quad (16)$$

где r_w – количество теплоты, отдаваемое частицей с каждой единицей массы влаги.

Векторы Q и T связаны соотношением $Q = T \cdot c \cdot \rho$, где c – вектор теплостойкостей влажных частиц и ρ – вектор их плотностей ($\cdot$ – означает поэлементное умножение матриц).

Методы экспериментального исследования. Экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного продукта (моркови) были проведены на установке, схема которой представлена на рис. 2а. Экспериментальная установка состояла из сушильного шкафа 1, весового устройства 2, исследуемого образца 3, термопар 4, модуля ввода аналогового сигнала 5 (МВА-8) и компьютера 6.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Два образца 3 длиной 150 мм и толщиной 30 мм помещали в сушильный шкаф 1. По толщине образца размещали 4 термопары типа ТХА(К). Для получения правильного представления о поле температур образца особое внимание обращали на точность размещения термопар 4 в образце. Для исключения переноса теплоты через электроды термопары устанавливали с торца и размещали в изотермических поверхностях. Точки замера температуры выбирали на оси тела или около нее, так как температурные градиенты здесь либо равны нулю, либо невелики. Все это позволяло величину ошибки при замере свести к минимуму. Сигнал с термопар поступал на аналоговый модуль МВА-8 и далее обрабатывался на компьютере 6. Показания

термопар фиксировали с интервалом времени в пять секунд. Сушку образца выполняли до установления постоянства его массы.

Схема расположения термопар в образце показана на рис. 2b. Термопары 1 и 2 были расположены симметрично по центру образца и заглублены на расстояние 7,5 мм от наружной цилиндрической поверхности; спаи термопар 3 и 4 были расположены на оси образца и заведены через его торцевые поверхности на глубину 45 мм.

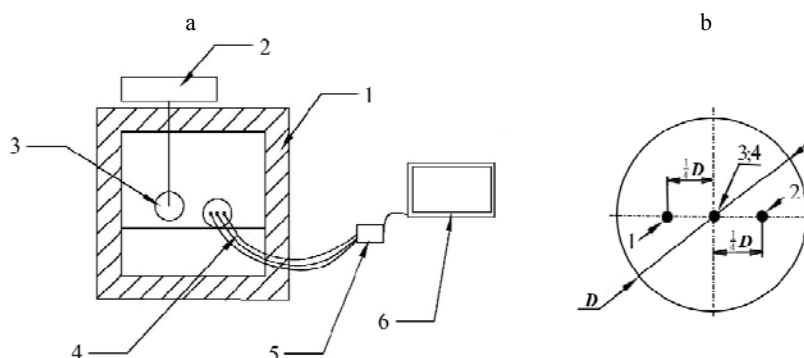


Рис. 2. а – схема экспериментальной установки: 1 – сушильный шкаф; 2 – весовое устройство; 3 – исследуемый образец; 4 – термопары; 5 – модуль ввода аналоговый; 6 – компьютер; б – характеристика схемы измерения температур: 1; 2; 3; 4 – точки расположения термопар в сечении образца

Fig. 2. а – experimental setup diagram: 1 – drying chamber; 2 – weighing device; 3 – test sample; 4 – thermocouples; 5 – analog input module; 6 – computer; б – characteristics of the temperature measurement diagram: 1; 2; 3; 4 – the location points of the thermocouples in the sample cross section

Для получения более достоверных результатов и снижения влияния случайных погрешностей один и тот же эксперимент повторяли пять раз. В качестве исходных данных для последующих расчетов принимали усредненные по числу опытов значения температур для данного режима нагрева.

Экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного материала проведены в трех температурных режимах при постоянной температуре сушильного агента, равной 100 °С, 150 °С и 200 °С. На рис. 3 представлены результаты эксперимента при температуре сушильного агента 150 °С. Аналогичные данные получены для температур сушильного агента, равных 100 и 200 °С. Погрешность проведения эксперимента не превышает 3 %.

Результаты и обсуждение

Некоторые результаты исследования, отражающие пространственно-временные характеристики происходящих в образце процессов тепло- и массопереноса, представлены на рис. 3–5. На рис. 3 представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений параметров на кривой сушке. Рис. 3 иллюстрирует кинетическую характеристику изменения влагосодержания в образце в целом.

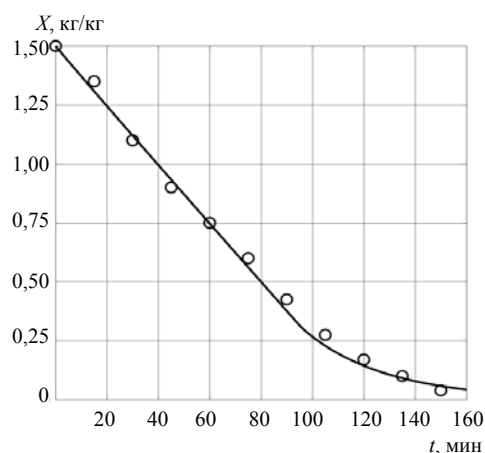


Рис. 3. Изменение влагосодержания образца со временем
 (маркеры – экспериментальные данные; линия – расчетный прогноз)

Fig. 3. Evolution of the moisture content in the sample over time
 (the markers represent experimental data; the line – calculated prediction)

Рис. 4 показывает интегральную скорость обезвоживания образца. Рис. 3, 4 позволяют судить о характере удаления влаги из образца. В начальный период скорость обезвоживания практически постоянна, однако в это время происходит незначительное снижение скорости влаги, особенно заметное в первые 20 минут процесса (рис. 4). При этом на графике изменения влагосодержания (рис. 3) это практически не заметно (нелинейность крайне незначительна). Очевидно, что внутренняя диффузия влаги незначительно лимитирует процесс, поэтому период постоянной скорости сушки в полной мере реализуется в период 40–90 минут. Затем наступает второй период сушки, характеризующийся резким падением скорости обезвоживания.

Результаты, представленные на рис. 3, свидетельствуют о приемлемой, с инженерной точки зрения, прогнозирующей эффективности модели (расхождение между прогнозом и экспериментальными точками не превышает 5 %).

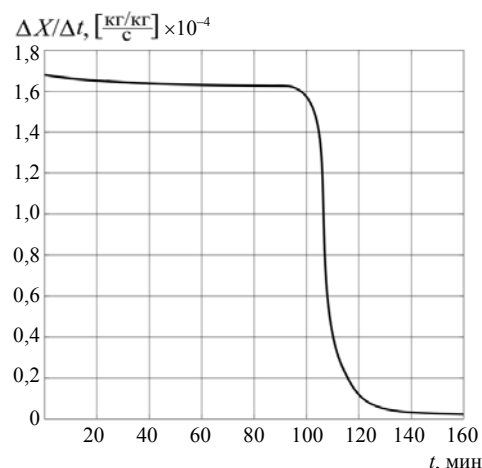


Рис. 4. Скорость изменения влагосодержания образца со временем

Fig. 4. Rate of change in sample moisture content over time

Результаты, представленные на рис. 5, 6, отражают локальные характеристики процессов тепломассопереноса. На рис. 5 показана расчетная дифференциальная характеристика обезвоживания образца. Следует отметить, что это не кривая скорости сушки, которая характеризует скорость убыли массы всего образца, это скорость убыли массы влаги поверхностного слоя материала, поэтому она имеет несколько иной (монотонно убывающий) характер.

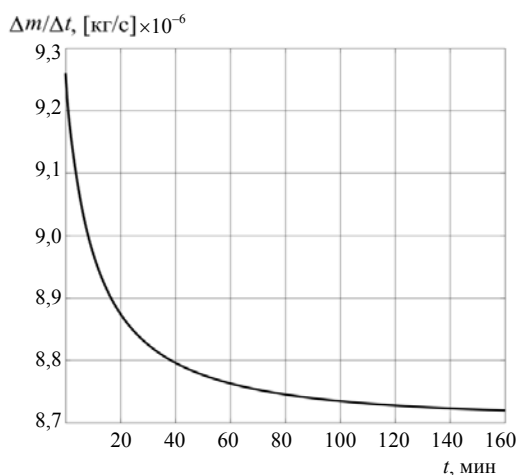


Рис. 5. Расчетное изменение скорости убыли массы влаги в наружном цилиндрическом слое

Fig. 5. Calculated evolution of the rate of loss of moisture mass in the outer cylindrical layer

Рис. 6 показывает локальные значения температур материала в процессе сушки образца. Результаты сравнения расчета и эксперимента показывают высокую прогнозирующую способность предложенной математической модели.

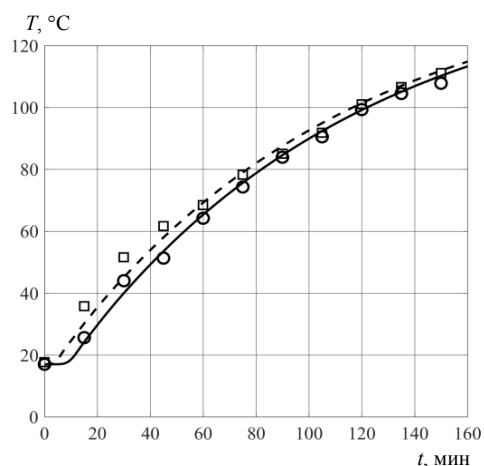


Рис. 6. Изменение температуры в различных точках образца со временем (маркеры – экспериментальные данные; линии – расчетные прогнозы): ○ – сплошная линия – на оси образца; □ – пунктирная линия – на расстоянии 7–8 мм оси образца

Fig. 6. Temperature evolution at various points of the sample over time (markers – experimental data; lines – calculated forecasts): ○ – solid line – on the sample axis; □ – dotted line – at a distance of 7–8 mm from the sample axis

ВЫВОДЫ

В ходе исследования решены задачи разработки и эмпирической проверки математической модели обезвоживания плодов моркови в процессе их подготовки к переработке в котлоагрегатах. Предложенная математическая модель сочетает описание сопряженных процессов внутреннего и внешнего тепломассообмена, что позволяет получать качественно-непротиворечивые решения. Выполненная в ходе собственных экспериментальных исследований эмпирическая проверка результатов моделирования позволяет с уверенностью констатировать высокую прогностическую эффективность модели.

Обобщая решение указанных задач исследования, можно предложить разработанную математическую модель в качестве основы компьютерного метода расчета тепломассообменных процессов при организации приготовления топлива из плодов моркови, использование которого позволит строить режимные карты с меньшим объемом экспериментальных работ, а также ставить и решать задачи оптимального управления энергоемкими процессами топливоподготовки по различным целевым функциям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
2. Фортов, В. Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. Лосюк, Ю. А. Некоторые аспекты термохимической конверсии торфа / Ю. А. Лосюк, С. В. Жибрик, С. В. Корчиненко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 5. С. 60–66.
4. Карпунин, И. И. Использование отходов растительного сырья для производства энергии / И. И. Карпунин, В. В. Кузьмич, Т. Ф. Балабанова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011. №6. С. 72–75.
5. Гриценко, А. В. Совместное сжигание продуктов пиролиза шин и древесных пеллет / А. В. Гриценко, Н. В. Внукова, Е. И. Позднякова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 4. С. 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-363-376>.
6. Model for Convective Drying of Carrots for Pyrolysis / F. M. Berruti [et al.] // Journal of Food Engineering. 2009. Vol. 92, No 2. P. 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.036>.
7. State-of-the-Art of the Pyrolysis and Co-Pyrolysis of Food Waste: Progress and Challenges / G. Su [et al.] // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 809. Article 151170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151170>.
8. Массопроводность при сушке ядер и оболочек семян подсолнечника / С. П. Рудобашта [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2021. Т. 64, вып. 5. С. 80–87. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216405.6337>.
9. Расчетно-экспериментальное исследование теплового процесса в одиночной цилиндрической частице / А. В. Митрофанов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2022. Т. 65, № 9. С. 97–104. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226509.6679>.

10. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed / V. Mizonov [et al.] // Recent Innovations in Chemical Engineering. 2018. Vol. 11, No 1. P. 20–28. <https://doi.org/10.2174/2405520410666170620105102>.
11. Theoretical and Experimental Study of Particulate Solids Drying in Circulating Fluidized Bed / A. Mitrofanov [et al.] // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 18, No 2. P. 267–276. <https://doi.org/10.17654/HM018020267>.
12. Акулич, П. В. Тепломассоперенос в цилиндрических пористых телах с учетом нестационарности параметров на углубляющейся границе испарения / П. В. Акулич // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2016. № 3. С. 71–76.
13. Оптимизация аппаратного оформления сушильных процессов в технике взвешенного слоя / В. Б. Сажин [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. 2007. Т. XXI, № 1 (69). С. 49–65.
14. Беркович, С. Я. Клеточные автоматы как модель реальности: поиски новых представлений физических и информационных процессов / С. Я. Беркович. М.: изд-во МГУ, 1993. 112 с.
15. Heat and Mass Transfer During Drying of a Bed of Shrinking Particles – Simulation for Carrot Cubes Dried in a Spout-Fluidized-Bed Drier / I. Białobrzewski [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 51, Iss. 19–20. P. 4704–4716. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.031>.
16. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / под ред. Г. М. Островского. СПб.: Профессинал, 2004. Ч. I. 848 с.
17. Dwivedi, P. N. Particle-Fluid Transfer in Fixed and Fluidized Beds / P. N. Dwivedi, S. N. Upadhyay // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. 1977. Vol. 16, No 2. P. 157–165. <https://doi.org/10.1021/i260062a001>.

Поступила 03.01.2023 Подписана в печать 09.03.2023 Опубликовано онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398> (in Russian).
2. Fortov V. E., Popel' O. S. (2014) The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 61 (6), 389–398. <https://doi.org/10.1134/s0040601514060020>.
3. Losiuk Y. A., Gibric S. V., Korchinenko S. V. (2008) Some Aspects of Thermochemical Decomposition of Peat. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 60–66 (in Russian).
4. Karpunin I. I., Kuzmich V. V., Balabanova T. F. (2011) Usage of Vegetal Wastes for Energy Production. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 72–75 (in Russian).
5. Grytsenko A. V., Vnykova N. V., Pozdnyakova O. I. (2021) Co-Combustion of Tire Pyrolysis Products and Wood Pellets. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (4), 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-363-376> (in Russian).

6. Berruti F. M., Klaas M., Briens C., F. Berruti F. (2009) Model for Convective Drying of Carrots for Pyrolysis. *Journal of Food Engineering*, 92 (2), 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.036>.
7. Su G., Ong H. C., Fattah I. M. R., Ok Y. S., Jang J.-H., Wang H.-T. (2022) State-of-the-Art of the Pyrolysis and Co-Pyrolysis of Food Waste: Progress and Challenges. *Science of The Total Environment*, 809, 151170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151170>.
8. Rudobashta S. P., Zueva G. A., Dmitriev V. M., Kochetkov V. N. (2021) Mass Conductivity for Drying Nuclei and Seed Sunflower Shells. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*, 64 (5), 80–87. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216405.6337> (in Russian).
9. Mitrofanov A. V., Ovchinnikov L. N., Ovchinnikov N. L., Ogurtsov A. V., Lapshina O. I. (2022) Computational and Experimental Study of the Thermal Process in an Individual Cylindrical Particle. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*, 65 (9), 97–104. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226509.6679> (in Russian).
10. Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L. (2018) Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 11 (1), 20–28. <https://doi.org/10.2174/2405520410666170620105102>.
11. Mitrofanov A., Mizonov V., Shuina E., Kasatkina N., Shpeynova N. (2019) Theoretical and Experimental Study of Particulate Solids Drying in Circulating Fluidized Bed. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 18 (2), 267–276. <https://doi.org/10.17654/HM018020267>.
12. Akulich P. V. (2016) Heat and Mass Transfer in Cylindrical Porous Bodies with Account of Nonstationarity of Parameters of Deepening Evaporation Boundary. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*, (3), 71–76 (in Russian).
13. Sazhin V. B., Sazhin B. S., Sazhina M. B., Otrubyanikov E. V. (2007) Optimization of Hardware Design of Drying Processes in the Technique of a Suspended Layer. *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], XXI (1), 49–65 (in Russian).
14. Berkovich S. Ya. (1993) *Cellular Automata as a Model of Reality: the Search for New Representations of Physical and Informational Processes*. Moscow, MSU Publ. 112 (in Russian).
15. Białobrzewski I., Zielińska M., Mujumdar A., Markowski M. (2008) Heat and Mass Transfer During Drying of a Bed of Shrinking Particles – Simulation for Carrot Cubes Dried in a Spout-Fluidized-Bed Drier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (19–20), 4704–4716. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.031>.
16. Ostrovskii G. M., Abiev R. Sh., Barabash V. M., Bilenko L. F., Bogdanov V. V., Britov V. P. (2004) *The New Handbook of Chemist and Technologist. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies. Ch. I*. St. Petersburg, Professional Publ. 848 (in Russian).
17. Dwivedi P. N., Upadhyay S. N. (1977) Particle-Fluid Transfer in Fixed and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 16 (2), 157–165. <https://doi.org/10.1021/i260062a001>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-387-400>

УДК 658.261:621.56

Технико-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на основе диоксида углерода

А. В. Овсянник¹⁾, В. П. Ключинский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Представлены схемы полигенерационных установок на основе диоксида углерода, в которых источником энергии служат вторичные энергетические ресурсы и газотурбинная установка. Данные схемы полигенерации позволяют одновременно производить электрическую энергию, теплоту, холод, диоксид углерода в жидком и газообразном агрегатном состоянии, а также утилизировать часть выбрасываемого в атмосферу диоксида углерода за счет абсорбции из продуктов сгорания и использования в коммерческих и технологических целях. Представлена структура математической модели разработанной программы для проведения эксергетического анализа схем полигенерации. При помощи разработанной программы произведен эксергетический анализ схем полигенерации, в котором сравнивались полигенерационные турбоустановки с различными параметрами диоксида углерода перед турбиной, а также однократным и двукратным перегревом диоксида углерода. В качестве сравниваемых критериев принимались эксергетический электрический КПД полигенерационных установок в целом и отдельных ее элементов. Наибольшей эффективностью обладают полигенерационные установки с двукратным перегревом и сверхкритическими параметрами диоксида углерода перед турбиной. Представлена методика расчета экономических показателей схем полигенерации, которая позволяет учитывать влияние двукратного перегрева и параметров диоксида углерода в стоимости полигенерационной установки. Получены показатели экономической эффективности различных вариантов схем полигенерации, такие как внутренняя норма доходности, чистый дисконтированный доход, статический и динамический сроки окупаемости. Установлено, что все варианты схем полигенерации обладают приемлемыми показателями экономической эффективности, статический срок окупаемости предложенных схем полигенерации не превышает пяти лет, а внутренняя норма доходности не снижается менее 22,8 %.

Ключевые слова: турбоустановка на диоксиде углерода, низкокипящее рабочее тело, производство углекислоты, эксергетический анализ, КПД, повышение эффективности, полигенерация, технико-экономический анализ, оптимизация, компьютерная программа, рекомендации, схемы полигенерации, показатели экономической эффективности, диоксид углерода, двукратный перегрев

Для цитирования: Овсянник, А. В. Технико-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на основе диоксида углерода / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 387–400. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-387-400>

Адрес для переписки

Овсянник Анатолий Васильевич
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
просп. Октября, 48,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 21-30-32
av.ovsyannik@mail.ru

Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.
Sukhoi State Technical
University of Gomel
48 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 21-30-32
av.ovsyannik@mail.ru

Feasibility Study of Polygeneration Turbine Plants Based on Carbon Dioxide

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

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

Abstract. Schemes of polygeneration plants based on carbon dioxide are presented, in which the energy source are secondary energy resources and a gas turbine plant. These polygeneration schemes make it possible to simultaneously produce electricity, heat, cold, carbon dioxide in liquid and gaseous aggregate state, as well as to dispose of part of the carbon dioxide emitted into the atmosphere, due to its absorption from combustion products and use for commercial and technological purposes. The structure of the mathematical model of the program that has been developed for the exergetic analysis of polygeneration schemes is presented. With the help of the program, an exergetic analysis of polygeneration schemes was performed, in which polygeneration turbine units with different parameters of carbon dioxide in front of the turbine, as well as single and double overheating of carbon dioxide were compared. The exergetic electrical efficiency of polygeneration plants as a whole and its individual elements were taken as the criteria to be compared. Polygeneration plants with double overheating and supercritical parameters of carbon dioxide in front of the turbine have the greatest efficiency. A method for calculating of the economic indicators of polygeneration schemes is presented, which makes it possible to take into account the influence of double overheating and carbon dioxide parameters in the cost of a polygeneration plant. The economic efficiency indicators of various versions of polygeneration schemes, such as the internal rate of return, net discounted income, static and dynamic payback periods are obtained. It has been established that all variants of polygeneration schemes have acceptable indicators of economic efficiency, the static payback period of the proposed polygeneration schemes does not exceed 5 years, while the internal rate of return does not decrease by less than 22,8%.

Keywords: carbon dioxide turbine plant, low-boiling working fluid, carbon dioxide production, exergy analysis, efficiency, improving efficiency, polygeneration, feasibility study, optimization, computer program, recommendations, polygeneration schemes, economic efficiency indicators, carbon dioxide, double superheat

For citation: Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2023) Feasibility Study of Polygeneration Turbine Plants Based on Carbon Dioxide. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 387–400. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-387-400> (in Russian)

Введение

Диоксид углерода – озонобезопасное, широко распространенное рабочее тело с низким потенциалом глобального потепления. Диоксид углерода находит все более широкое распространение в качестве холодильного агента, а также хладоносителя. Углекислота находит применение в различных отраслях промышленности: целлюлозно-бумажной, пищевой, фармацевтической, горнодобывающей, химической и др.

Для производства углекислоты в настоящее время получили распространение специальные промышленные углекислотные установки, большинство из которых используют в качестве источника продукты сгорания.

Помимо углекислоты промышленные предприятия также нуждаются в электрической, тепловой энергии и холоде. Как правило, все это либо закупается извне, либо производится по отдельности (например, электрическая и тепловая энергия – на мини-ТЭЦ, холод – в парокомпрессионных холодильных установках, а углекислота – в углекислотных установках).

Для совместного получения различных видов энергии в работах [1, 2] предложены схемы тригенерационных и полигенерационных установок с производством углекислоты (рис. 1). Для производства углекислоты предложенные установки используют дымовые газы предприятий либо выхлопные газы ГТУ, что позволяет отбирать часть выбрасываемой в атмосферу углекислоты и тем самым снижать экологическое давление предприятия на окружающую среду. В разработанных схемах полигенерационных установок для производства электрической энергии предложено использовать турбоустановки на диоксиде углерода, что обуславливает целый ряд преимуществ: низкие температуры источника энергии, простота конструкции, высокая автоматизация процесса, отсутствие химводоподготовки, отсутствие коррозионных отложений, эрозионных разрушений роторов турбин и др.

Схема и принцип работы установки

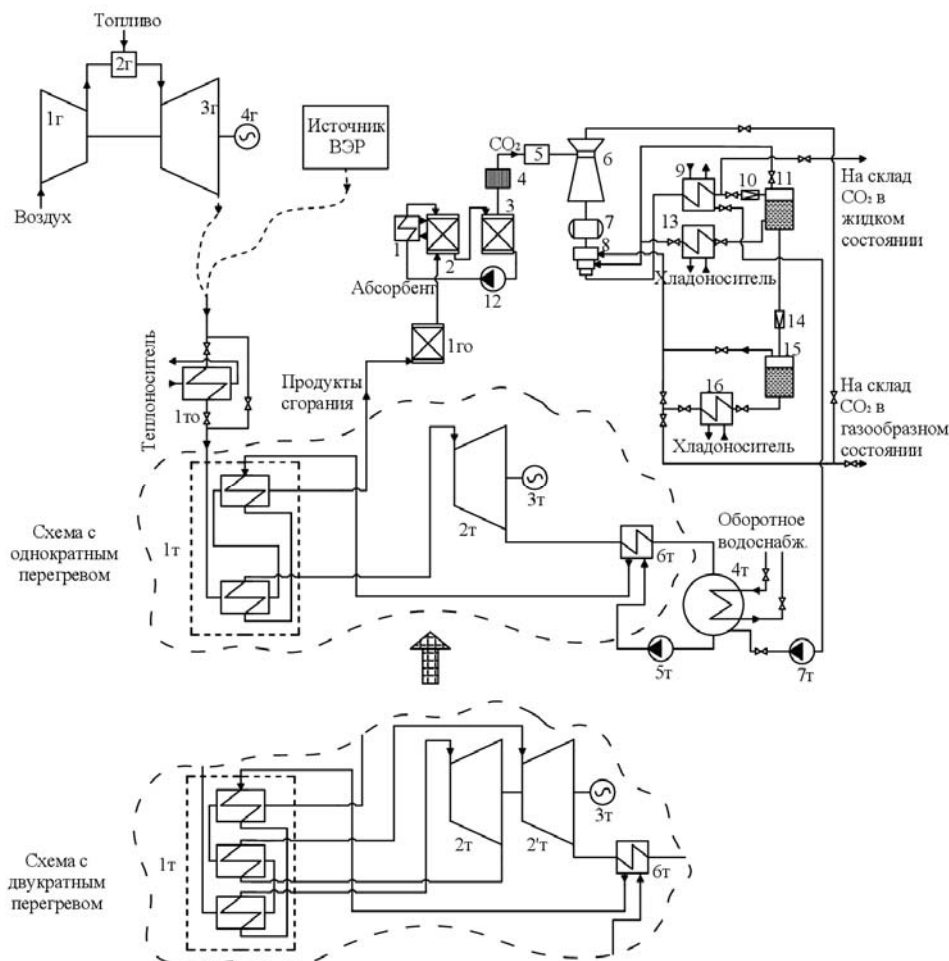


Рис. 1. Схема полигенерационной установки

Fig. 1. Diagram of a polygeneration plant

Воздух из атмосферы поступает в компрессор 1г. В компрессоре воздух сжимается и подается в камеру сгорания 2г, куда одновременно поступает и топливо. После сгорания горячие продукты сгорания поступают в газовую турбину 3г, где совершают работу по вращению вала турбины и генератора 4г. Далее продукты сгорания ГТУ либо высокотемпературные ВЭР (в зависимости от варианта схемы) поступают в подогреватель, где передают часть своей теплоты теплоносителю. Затем продукты сгорания направляются в котел-утилизатор (КУ) 1т, где и отдают оставшуюся часть теплоты диоксиду углерода. Углекислота, превратившись в пар в котле-утилизаторе, а при необходимости и пройдя процесс перегрева, поступает в турбину 2т, где совершает работу по вращению вала турбины и генератора 3т. Для схемы с двукратным перегревом рабочего тела углекислота, пройдя часть высокого давления турбины, направляется в промежуточный перегреватель и далее в часть низкого давления турбины 2'т. Пройдя все ступени турбины, углекислота поступает в теплообменный аппарат 6т, где нагревает сконденсировавшиеся в конденсаторе 4т пары углекислоты. Далее насосом 5т углекислота через теплообменный аппарат 6т подается в котел-утилизатор. Продукты сгорания поступают в очистительную установку, где очищаются от механических примесей и сернистых соединений и подаются в абсорбер, а затем в десорбер, где из продуктов сгорания отделяется чистая углекислота, которая при помощи инжектора 6 подается в ресивер 7. Из ресивера сжатый в компрессоре 8 диоксид углерода подается в теплообменник-конденсатор 9. Часть сконденсировавшейся углекислоты отправляется на склад, а часть дросселируется в регулирующем вентиле 10 и сепарируется в сепараторе 11. Из сепаратора жидкая углекислота разделяется на два потока. Первый поток поступает в теплообменник-испаритель 13, второй – на вторую ступень дросселирования 14 и сепарируется в сепараторе 15. Полученная жидкая углекислота используется для получения холода в теплообменнике-испарителе 16. Часть испарившейся в теплообменнике-испарителе 16 углекислоты поступает на склад, а часть отправляется снова в компрессор. Подпитка углекислотой конденсатора 4г производится насосом подпитки цикла 7т.

Условия технико-экономического анализа

Условия проведения технико-экономического анализа полигенерационных установок представлены в табл. 1. Анализируемые варианты установок представлены на рис. 2.

Таблица 1

Условия проведения технико-экономического анализа
Conditions for conducting feasibility study

Параметр	Значение
Расход топлива ГТУ, м ³ /ч	1000
КПД газовой турбины, %	85
КПД компрессора ГТУ, %	85

Окончание табл. 1

Параметр	Значение
Механический КПД газовой турбины, %	98
КПД генератора ГТУ, %	97
Низшая теплота сгорания топлива ГТУ, кДж/м ³	35 800
Температура ВЭР, °C	135
Тепловая мощность ВЭР, кВт	10 000
Внутренний относительный КПД турбины на углекислоте, %	82
Механический КПД турбины на углекислоте, %	98
Индикаторный КПД насоса подачи углекислоты, %	80
КПД генератора турбоустановки, %	97
КПД теплообменного аппарата, %	98
Механический КПД углекислотного компрессора, %	88
Внутренний относительный КПД углекислотного компрессора, %	75
Температурный напор в конденсаторе углекислотной установки, °C	5
КПД электродвигателя углекислотного компрессора, %	94
Температура окружающей среды, °C	15
Мощность потока теплоты для подогрева теплоносителя, кВт	1000
Мощность потока холода с температурой +4 °C, кВт	200
Мощность потока холода с температурой –18 °C, кВт	300
Необходимое количество углекислоты, кг/ч:	
в жидком агрегатном состоянии	190
в газообразном агрегатном состоянии	380

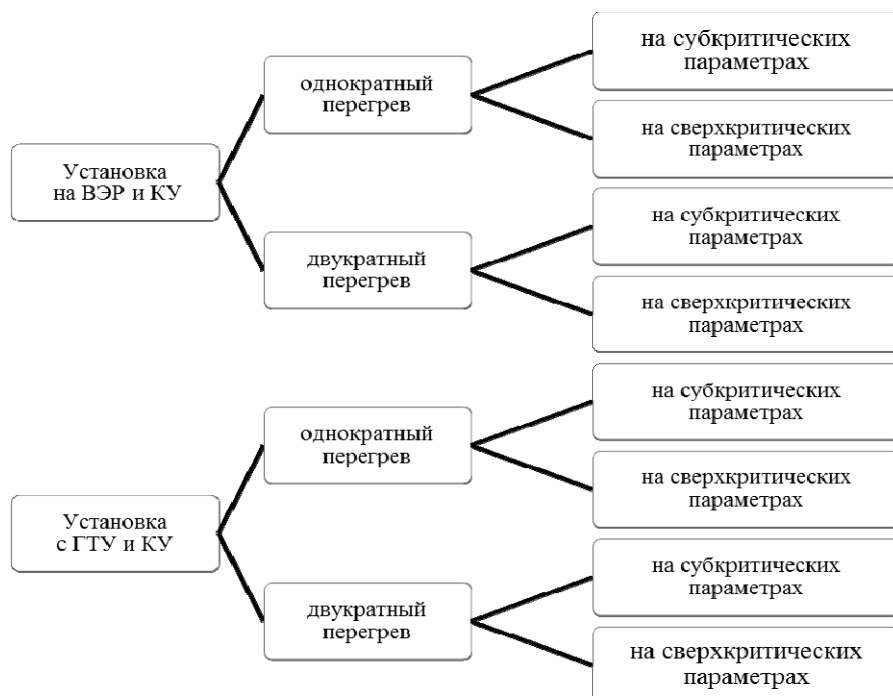


Рис. 2. Варианты исследуемых полигенерационных установок

Fig. 2. Versions of the scheme of polygeneration under study

Методика термодинамического анализа

Анализ полигенерационных установок производился при помощи разработанной программы для моделирования, проведения эксергетического анализа и оптимизации тригенерационных и полигенерационных установок на основе низкокипящих рабочих тел [3]. В основе методики эксергетического анализа лежат труды Я. Шаргута, Р. Петела, В. М. Бродянского, В. Фраштера и др. Структура математической модели программы представлена в табл. 2.

Таблица 2

Структура математической модели программы
The structure of the mathematical model of the program

Этап	Наименование	Пояснения
1	Исходные данные	Определяются исходные данные (эффективность элементов установки, параметры, объемы производимой продукции и др.)
2	Параметры в характерных точках полигенерационной установки	На основании представлений о протекающих процессах в элементах установки определяются параметры в характерных точках полигенерационной установки
3	Эксергия в характерных точках полигенерационной установки	На основании полученных параметров определяется значение эксергии в характерных точках полигенерационной установки
4	Потери эксергии в элементах полигенерационной установки	Полученные значения эксергии в характерных точках полигенерационной установки позволяют определить потери эксергии в элементах установки, выявляя элементы, в которых наблюдаются наибольшие потери
5	Эксергетический КПД полигенерационной установки	В общем виде эксергетический КПД определяется как отношение потока эксергии, соответствующего полезному эффекту, к потоку эксергии, отражающему затраты. Характеризует степени совершенства процесса [4–6, 8]

Одним из основных анализируемых эксергетических показателей схем полигенерации является эксергетический КПД (1).

Формула определения эксергетического КПД термодинамической системы выглядит следующим образом [4–8]:

$$\eta_e = \frac{\sum_{i=1}^n (E''_{\text{эн},i} - E^{tr}_{\text{эн},i}) + \sum_{j=1}^m M_j [(e''_{p,t,j} - e^{tr}_{p,t,j}) + (e''_{x,j} - e^{tr}_{x,j})]}{\sum_{i=1}^n (E'_{\text{эн},i} - E^{tr}_{\text{эн},i}) + \sum_{j=1}^m M_j [(e'_{p,t,j} - e^{tr}_{p,t,j}) + (e'_{x,j} - e^{tr}_{x,j})]}, \quad (1)$$

где $E'_{\text{эн},i}$, $E''_{\text{эн},i}$ – эксергия i -го потока энергии на входе и выходе из термодинамической системы соответственно, Дж; $E^{tr}_{\text{эн},i}$ – транзитная эксер-

гия i -го потока энергии, Дж; M_j – масса j -го потока вещества, кг; $e'_{p,t,j}, e''_{p,t,j}$ – термомеханическая эксергия j -го потока вещества на входе и выходе из термодинамической системы соответственно, Дж/кг; $e^{tr}_{p,t,j}$ – транзитная термомеханическая эксергия j -го потока вещества, Дж/кг; $e'_{x,j}, e''_{x,j}$ – химическая эксергия j -го потока вещества на входе и выходе из термодинамической системы соответственно, Дж/кг; $e^{tr}_{x,j}$ – транзитная химическая эксергия j -го потока вещества, Дж/кг.

Методика определения экономических показателей эффективности полигенерационных установок

Наиболее сложной задачей при определении показателей экономической эффективности полигенерационных установок является определение их стоимости.

Стоимость полигенерационной установки можно определить следующим образом:

$$S_{\sum}^{\text{полиген}} = S^{\text{ПД}} + S^{\text{ГТУ}} + S^{\text{ТУ}} + S^{\text{УиХ}}, \quad (2)$$

где $S^{\text{ПД}}$ – стоимость подогревателя теплоносителя, руб.; $S^{\text{ГТУ}}$ – стоимость газотурбинной установки, руб.; $S^{\text{ТУ}}$ – стоимость турбоустановки, руб.; $S^{\text{УиХ}}$ – стоимость установки совместного производства углекислоты и холода, руб.

Стоимость подогревателя теплоносителя

$$S^{\text{ПД}} = N^{\text{ПД}} s^{\text{ПД}}, \quad (3)$$

где $N^{\text{ПД}}$ – мощность подогревателя, кВт; $s^{\text{ПД}}$ – удельная стоимость подогревателя, руб./кВт.

Стоимость ГТУ

$$S^{\text{ГТУ}} = N^{\text{ГТУ}} s^{\text{ГТУ}}, \quad (4)$$

где $N^{\text{ГТУ}}$ – мощность ГТУ, кВт; $s^{\text{ГТУ}}$ – удельная стоимость ГТУ, руб./кВт.

Стоимость турбоустановки

$$S^{\text{ТУ}} = \left(1 + (T_d^{\text{ТУ}} - T_{\text{баз}}^{\text{ТУ}}) k_t^{\text{ТУ}} + (P_d^{\text{ТУ}} - P_{\text{баз}}^{\text{ТУ}}) k_p^{\text{ТУ}} + k_{\text{ВП}}^{\text{ТУ}} \right) \times \\ \times S_{\text{баз}}^{\text{ТУ}} (1 - k_{\text{тп}}) + S_{\text{баз}}^{\text{ТУ}} k_{\text{тп}}, \quad (5)$$

где $T_d^{\text{ТУ}}, T_{\text{баз}}^{\text{ТУ}}$ – действительная и базовая температура диоксида углерода перед ЧВД турбины, °К; $P_d^{\text{ТУ}}, P_{\text{баз}}^{\text{ТУ}}$ – действительное и базовое давление

диоксида углерода перед ЧВД турбины, кПа; k_t^{TY} – коэффициент увеличения стоимости турбоустановки при изменении температуры диоксида углерода перед ЧВД турбины, ед./°К; k_p^{TY} – коэффициент увеличения стоимости турбоустановки при изменении давления диоксида углерода перед ЧВД турбины, ед./кПа; $k_{ВП}^{TY}$ – коэффициент увеличения стоимости турбоустановки при использовании вторичного перегрева, ед.; $k_{ВП}^{TY}$ – коэффициент увеличения стоимости турбоустановки при использовании вторичного перегрева, ед.; $k_{тп}$ – коэффициент, учитывающий элементы, стоимость которых не зависит от параметров турбоустановки, ед.

Стоимость установки по производству углекислоты и холода

$$S^{YиX} = S_{баз}^Y + \left(\sum_{i=1}^n (N_i^{YиX} s_{уд}^{YиX} - N_i^Y s_i^Y) + S_{доп.обор}^{YиX} \right) k_{ре}^{YиX}, \quad (6)$$

где $S_{баз}^Y$ – стоимость базового варианта углекислотной установки, руб.; $N_i^{YиX}$ – мощность элемента установки для производства углекислоты и холода, кВт; $s_{уд}^{YиX}$ – удельная элемента установки для производства углекислоты и холода, руб./кВт; N_i^Y – мощность элемента установки для производства углекислоты, кВт; s_i^Y – удельная элемента установки для производства углекислоты, руб./кВт; $S_{доп.обор}^{YиX}$ – стоимость дополнительного оборудования (испарителей, дросселей, сепараторов и т.д.), руб.; $k_{ре}^{YиX}$ – коэффициент, учитывающий стоимость строительно-монтажных, пусконаладочных и проектных работ, ед.

Определив стоимость полигенерационной установки, расчет чистого дисконтированного дохода, статического и динамического сроков окупаемости и т. д. не составит труда.

Результаты термодинамического анализа полигенерационных установок

Параметры диоксида углерода перед частью высокого давления (ЧВД) и частью низкого давления (ЧНД) турбины представлены в табл. 3. В качестве сверхкритических параметров рабочего тела принимались термодинамически оптимальные параметры, т. е. параметры, при которых достигается максимальная эксергетическая эффективность турбоустановок на диоксиде углерода.

Учитывая, что для всех исследуемых вариантов схем полигенерации количество тепловой энергии, холода, углекислоты, вырабатываемых в полигенерационной установке, и их параметры одинаковы, то сравнительный анализ вышеупомянутых схем можно вести по вырабатываемой и потребляемой в установке электрической энергии. Результаты термодинамиче-

ского расчета полигенерационных установок представлены в табл. 4. В табл. 4 представлено распределение эксергии электрической энергии по производящим и потребляющим электричество элементам полигенерационной установки, сумма которых представляет электрический эксергетический КПД полигенерационной установки.

Таблица 3

Параметры диоксида углерода**Carbon dioxide parameters**

Схема	Температура перед ЧВД турбины, °C	Давление перед ЧВД турбины, МПа	Температура перед ЧНД турбины, °C	Давление перед ЧНД турбины, МПа
Субкритические параметры	250	6,0	–	–
	250	6,0	250	5,0
Сверхкритические параметры	250	21,3	–	–
	250	26,4	250	13,7

Таблица 4

Результаты эксергетического расчета полигенерационных установок**Results of exergy calculation of polygeneration plants**

Источник энергии	Вариант схемы		Эксергия вырабатываемого и потребляемого электричества, %				
	Перегрев	Параметры	ГТУ	ТУ	Н	К	Σ
ГТУ	Однократный	Субкритические	28,8	1,1	–0,2	–1,4	28,3
		Сверхкритические	28,8	11,7	–4,1	–1,4	35,0
	Двукратный	Субкритические	28,8	0,8	–0,1	–1,4	28,1
		Сверхкритические	28,8	13,5	–4,9	–1,4	36,0
ВЭР	Однократный	Субкритические	–	2,5	–0,4	–2,3	–0,2
		Сверхкритические	–	41,5	–14,4	–2,3	24,9
	Двукратный	Субкритические	–	2,3	–0,3	–2,3	–0,3
		Сверхкритические	–	47,9	–17,5	–2,3	28,2

Сравнительный анализ схем с ГТУ и ВЭР между собой не производится, так как данные схемы имеют различные области применения. Так, применение схем полигенерационных установок на вторичных энергетических ресурсах обусловлено наличием ВЭР с невысокой температурой. А применение схем полигенерационных установок на диоксиде углерода с ГТУ, согласно [9, 10], имеет место при распределенной генерации энергии в условиях отрицательных температур, когда нельзя допустить возникновения аварии вследствие замерзания воды в паротурбинной установке, а также в составе установок малой мощности.

Из табл. 4 видно, что полигенерационные установки с субкритическими параметрами диоксида углерода обладают невысокой эксергетической эффективностью. Так, для схем с ГТУ эксергетическая эффективность не превышает 28,3 % эксергии топлива, а для схем на ВЭР имеет отрица-

тельное значение, т. е. полигенерационная установка потребляет больше электрической энергии, чем производит.

Сравнив схемы субкритических полигенерационных установок с однократным и двукратным перегревом, видно, что применение двукратного перегрева рабочего тела при неизменном давлении перед ЧВД турбины приводит к снижению эффективности полигенерационной установки. Так, например, эксергия электрической энергии, вырабатываемой в полигенерационной установке с ГТУ и однократным перегревом углекислоты, составляет 28,3 % эксергии, поступающей с топливом в ГТУ, а для схемы с двукратным перегревом – 28,1 % соответственно.

Повышение параметров углекислоты до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений позволяет значительно улучшить эффективность турбоустановок на диоксиде углерода и полигенерационных установок в целом. Так, повышение параметров турбоустановки с однократным перегревом рабочего тела для схемы, работающей на ВЭР, позволяет дополнительно превратить в эксергию электрической энергии 25,1 % эксергии ВЭР, а для схемы с двукратным перегревом – 28,5 % эксергии ВЭР.

Применение двукратного перегрева в схемах полигенерации со сверхкритическими параметрами диоксида углерода позволяет улучшить термодинамическую эффективность полигенерации. При этом дополнительно в электрическую энергию превращается от 1,0 до 3,3 % (в зависимости от варианта схемы полигенерационной установки) эксергии топлива или ВЭР соответственно.

Результаты анализа экономических показателей эффективности полигенерационных установок

Для предложенных вариантов схем полигенерационных установок определены экономические показатели эффективности (табл. 5): статический срок окупаемости, внутренняя норма доходности, динамический срок окупаемости, чистый дисконтированный доход (ЧДД). Необходимо обратить внимание, что варианты схем полигенерации с двукратным перегревом и субкритическими параметрами диоксида углерода перед турбиной обладают меньшей термодинамической эффективностью, чем аналогичные варианты схем с однократным перегревом. При этом из (5) видно, что вторичный перегрев приводит к удорожанию таких схем. Таким образом, можно однозначно утверждать, что схемы с двукратным перегревом диоксида углерода и субкритическими параметрами, обладая меньшей эффективностью и большей стоимостью, будут экономически менее эффективны, чем схемы с однократным перегревом. Поэтому расчет и анализ показателей их экономической эффективности нецелесообразен.

В табл. 5 представлен анализ следующих вариантов схем: вариант № 1 – полигенерационная установка с однократным перегревом и субкритическими параметрами углекислоты перед турбиной; вариант № 2 – со сверхкритическими параметрами углекислоты перед турбиной; ва-

риант № 3 – со сверхкритическими параметрами и двукратным перегревом углекислоты в котле-утилизаторе. При этом для схем на вторичных энергетических ресурсах, как правило, необходимо производить очистку продуктов сгорания, что отражается на стоимости всей установки.

Таблица 5

Экономические показатели эффективности полигенерационных установок

Economic performance indicators of polygeneration plants

Показатель	ГТУ			ВЭР		
	Вар. № 1	Вар. № 2	Вар. № 3	Вар. № 1	Вар. № 2	Вар. № 3
Отпуск электрической энергии, $\times 10^6$ МВт·ч/год	21,07	26,06	26,81	968	10424	11839
Отпуск тепловой энергии, $\times 10^3$ МВт·ч/год	7,37					
Отпуск холода (+4 °C), $\times 10^3$ МВт·ч/год	1,49					
Отпуск холода (–18 °C), $\times 10^3$ МВт·ч/год	2,23					
Отпуск жидкого CO ₂ , $\times 10^3$ т/год	1,42					
Отпуск газообразного CO ₂ , $\times 10^3$ т/год	2,83					
Экономический эффект, $\times 10^6$ руб./год	8,25	9,68	9,90	2,19	5,44	5,91
Стоимость установки, $\times 10^6$ руб.	9,94	12,78	13,20	4,53	10,72	11,66
Расходы на эксплуатацию, $\times 10^6$ руб./год	8,25	9,68	9,90	0,41	0,96	1,05
Статический срок окупаемости, лет	4,3	3,7	3,6	2,5	2,4	2,4
Внутренняя норма доходности, %	22,8	27,0	27,5	39,3	41,7	41,7
При ставке дисконтирования 10 %						
Динамический срок окупаемости, лет	5,9	4,8	4,7	3,1	2,9	2,9
ЧДД, тыс. руб.	9,66	16,83	17,91	10,63	27,41	29,73
При ставке дисконтирования 15 %						
Динамический срок окупаемости, лет	7,5	5,8	5,6	3,5	3,2	3,2
ЧДД, тыс. руб.	4,47	8,99	9,67	6,62	17,31	18,77
При ставке дисконтирования 20 %						
Динамический срок окупаемости, лет	10,9	7,3	7,0	3,9	3,6	3,6
ЧДД, $\times 10^6$ руб.	1,27	4,16	4,59	4,14	11,09	12,01
При ставке дисконтирования 25 %						
Динамический срок окупаемости, лет	>20	11,3	10,5	4,6	4,1	4,1
ЧДД, $\times 10^6$ руб.	–	0,97	1,25	2,51	6,99	7,56

Из полученных результатов видно, что схема полигенерации с ГТУ на субкритических параметрах диоксида углерода перед турбиной не отли-

чается высокой экономической эффективностью. Динамический срок окупаемости данного варианта схемы при ставке дисконтирования 25 % составляет более 20 лет, что превышает срок службы такого рода установок.

Повышение параметров углекислоты в турбоустановке до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений улучшает показатели эффективности схем полигенерации. Данное утверждение справедливо как для полигенерационных установок с ГТУ (внутренняя норма доходности увеличивается с 22,8 до 27,0 %), так и для установок, работающих на вторичных энергетических ресурсах (внутренняя норма доходности увеличивается с 39,3 до 41,7 %).

Применение двукратного перегрева углекислоты в котле-утилизаторе также улучшает показатели экономической эффективности совместного производства различных видов энергии и углекислоты (для схем с ГТУ увеличение внутренней нормы доходности составляет 0,5 %). Однако для схем полигенерации, работающих на ВЭР, использование двукратного перегрева оказывает влияние лишь на ЧДД от реализации проекта, который при ставке дисконтирования 25 % увеличивается с 6,99 до 7,56 %. Объясняется это относительно небольшим сроком окупаемости таких установок (до пяти лет), что не позволяет в полной мере проявиться экономическому эффекту от дополнительно вырабатываемой электрической энергии при применении двукратного перегрева.

В целом полигенерационные установки на основе диоксида углерода обладают хорошими показателями экономической эффективности, что свидетельствует о целесообразности применения данных схем для производства электрической энергии, теплоты, холода, жидкой и газообразной углекислоты.

ВЫВОДЫ

Предложены схемы полигенерационных установок, которые позволяют одновременно производить электрическую и тепловую энергию, холод и диоксид углерода.

Представлена структура математической модели программы для проведения эксергетического анализа схем полигенерации, а также методика определения показателей экономической эффективности полигенерационных установок.

Установлена область применения полигенерационных установок с ГТУ на диоксиде углерода: при распределенной генерации энергии в условиях отрицательных температур, когда нельзя допустить возникновения аварии вследствие замерзания воды в паротурбинной установке или в составе установок малой мощности.

На основе разработанной программы произведен эксергетический анализ предложенных схем полигенерации, по результатам которого можно сделать следующие выводы:

- полигенерационные установки с субкритическими параметрами диоксида углерода не отличаются высокой термодинамической эффективностью (эксергетический электрический КПД таких установок не превышает 28,3 %);
- применение двукратного перегрева рабочего тела при неизменном субкритическом давлении перед ЧВД турбины может приводить к снижению термодинамической эффективности полигенерационной установки, так для схемы с ГТУ значение эксергии топлива, преобразовываемого в электрическую энергию, снижается с 28,3 до 28,1 %;
- повышение параметров углекислоты до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений позволяет значительно улучшить эффективность турбоустановок на диоксиде углерода и полигенерационных установок в целом. Так, для схемы на ВЭР количество эксергии ВЭР, превращаемых в электрическую энергию, увеличивается с 2,1 % до 27,1 %;
- применение двукратного перегрева в схемах полигенерации со сверхкритическими параметрами диоксида углерода улучшает термодинамическую эффективность полигенерации (количество эксергии ВЭР, превращаемой в электричество, увеличивается на 3,3 %).

На основании произведенного экономического анализа схем полигенерации можно установить:

- полигенерационные установки с ГТУ на субкритических параметрах диоксида углерода перед турбиной не отличаются высокой экономической эффективностью (динамический срок окупаемости при ставке дисконтирования 25 % превышает 20 лет);
- повышение параметров углекислоты в турбоустановке до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений значительно улучшает показатели эффективности схем полигенерации (статический срок окупаемости для схем с ГТУ снижается с 4,3 до 3,7 лет);
- применение двукратного перегрева углекислоты в котле-утилизаторе улучшает показатели экономической эффективности совместного производства различных видов энергии и углекислоты (увеличение чистого дисконтированного дохода как для схем на ВЭР, так и для схем с ГТУ более чем на 250 тыс. рублей).

Можно заключить, что полигенерационные установки на основе диоксида углерода обладают хорошими показателями как термодинамической, так и экономической эффективности, что свидетельствует о целесообразности применения данных схем для производства электрической энергии, теплоты, холода, жидкой и газообразной углекислоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Trigenation Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainer and Recovery Boiler / A. V. Ovsyannik [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683, № 4. P. 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.
2. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>.

3. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2020. № 3/4. С. 108–115.
4. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
5. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 295 с.
6. Сажин, Б. С. Эксергетический анализ работы промышленных установок / Б. С. Сажин, А. П. Булеков, В. Б. Сажин. М.: Московский государственный текстильный университет им. А. Н. Косыгина, 2000. 297 с.
7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
8. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 280 с.
9. Гафуров, А. М. Перспективные области применения энергетических установок на низкипящих рабочих телах / А. М. Гафуров // Вестник Казан. гос. энергет. ун-та. 2015. № 1 (25). С. 93–98.
10. Тарасов, С. А. Газотурбинная установка малой мощности с утилизацией теплоты в контуре с низкипящим рабочим телом / С. А. Тарасов, В. А. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. № 1. С. 61–68.

Поступила 25.10.2022 Подписана в печать 03.01.2023 Опубликовано онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Ovsyannik A. V., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I., Klyuchinski V. P. (2020) Trigeneration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detander and Recovery Boiler. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683 (4), 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.
2. Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian).
3. Ovsyannik A. V., Klyuchinski V. P. (2020) Development of the Software for Optimization the Parameters of a Low-Boiling Working Substance in a Turbo-Expander Installation. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, (3/4), 108–115 (in Russian).
4. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K. (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
5. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia Publ. 295 (in Russian).
6. Sazhin B. S., Bulekov A. P., Sazhin V. B. (2000) *Exergetic Analysis of the Work of Industrial Installations*. Moscow, Moscow State Textile University Named After A. N. Kosygin. 297 (in Russian).
7. Grigorieva V. A., Zorina V. M. (1988) *Theoretical Foundations of Heat Engineering. Thermal Engineering Experiment*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 560 (in Russian).
8. Shargut Y., Petela R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energia Publ. 280 (in Russian).
9. Gafurov, A. M. (2015) Promising Areas of Application of Power Plants on Low-Boiling Working Bodies. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta = Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 1 (25), 93–98 (in Russian).
10. Tarasov S. A., Fomin V. A. (2017) Gas-Turbine Installation of Small Capacity with Heat Utilization in a Low Boiling Fluid Circuit. *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti SPbGPU [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology]*, 23 (1), 61–68 (in Russian).

Received: 25 October 2022

Accepted: 3 January 2023

Published online: 31 July 2023