

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ
ЭНЕРГЕТИКА Том 69, № 1
2026

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Stan V. K., Bukhanov D. G., Koshlich Yu. A.** Improving Performance of Fitting Energy-Saving Measures of Buildings Using Artificial Neural Networks
(Стан В. К., Буханов Д. Г., Кошлич Ю. А. Повышение качества подбора энергосберегающих мероприятий зданий при использовании искусственных нейронных сетей) 5

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В.** Определение текущей частоты в цифровых органах релейной защиты 23
Гречихин Л. И. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Часть 2: Формирование электрического тока смещения и вольт-амперной характеристики в биполярном транзисторе 34

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Рыжова Т. В., Тумаркина Д. Д., Бухаров Д. Н., Самышкин В. Д., Лелекова А. Ф., Аракелян М. М., Кучерик А. О., Аракелян С. М.** Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер. Часть 2 50
Сорокин В. В. Расчет влияния отравления на производительность пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР 64
Колосов М. В., Липовка А. Ю., Липовка Ю. Л. Нейронная сеть прогнозирования теплового потребления здания 77

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

- В. Ю. РУМЯНЦЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
П. В. ЖУКОВСКИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
Ф. А. РОМАНЮК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
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),
Г. Н. УЗАКОВ (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (РУП «Белинвестэнергосбережение», Минск, Республика Беларусь)

Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик

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

Подписано к печати 30.01.2026. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. 8,93. Тираж экз.
Дата выхода в свет . 2025. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2026

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 69, No 1
2026

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Belarusian National Technical University

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

CONTENTS

GENERAL POWER ENGINEERING

- Stan V. K., Bukhanov D. G., Koshlich Yu. A.** Improving Performance of Fitting Energy-Saving Measures of Buildings Using Artificial Neural Networks 5

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V.** Determining the Current Frequency in Digital Relay Protection Devices 23
- Gretchikhin L. I.** Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions. Part 2: Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium 34

HEAT POWER ENGINEERING

- Ryzhova T. V., Tumarkina D. D., Bukharov D. N., Samishkin V. D., Leleko-va A. F., Arakelyan M. M., Kucherik A. O., Arakelyan S. M.** Technologies for Improving the Operational Characteristics of Dynamic Gas-Liquid Thermal Power Plants with Controlled Laser Induction of Adjustable Local Configurations of Topological Micro- and Nanostructures on the Internal Metal Surface of Working Chambers. Part 2 50
- Sorokin V. V.** Calculation of the Impact of Poisoning Effect on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of a Localizing Safety System at a Nuclear Power Plant Equipped with Water-Cooled Water Reactors 64
- Kolosov M. V., Lipovka A. Yu., Lipovka Yu. L.** Neural Network for Predicting Building Heat Consumption 77

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

- V. Yu. RUMIANTSEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
- W. T. WÓJCIK* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
- V. V. GALAKTIONOV* (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
- M. DADO* (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
- P. W. ZHUKOWSKI* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
- V. V. IVASHECHKIN* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- A. S. KALINICHENKO* (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),
- A. KONNOV* (Lund University, Sweden),
- K. MAHKAMOV* (Northumbria University, United Kingdom),
- A. A. MIKHALEVICH* (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
- NGO TUAN KIET* (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
- O. G. PENYAZKOV* (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
- E. N. PISMENNYI* (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),
- F. A. ROMANIUK* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- 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),
- G. N. UZAKOV* (Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan),
- B. M. KHROUSTALEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- L. V. SHENETS* (RUE “Belinvestenergoberezhnie”, Minsk, Republic of Belarus)

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

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

Passed for printing 30.01.2026. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,75.
An edition of copies. Date of publishing 2025. Order list .

ADDRESS

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

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

© Belarusian National Technical University, 2026

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-5-22>

UDC 004.048; 004.051

Improving Performance of Fitting Energy-Saving Measures of Buildings Using Artificial Neural Networks

V. K. Stan¹⁾, D. G. Bukhanov¹⁾, Yu. A. Koshlich¹⁾

¹⁾Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov
(Belgorod, Russian Federation))

Abstract. The article is devoted to increasing energy saving and energy efficiency of public sector institutions by automation of the process of energy-saving measures fitting. A classifier based on an artificial neural network is proposed as a technology for selecting measures. The base numeric dataset was supplemented by categorical data on buildings and structures. The urgency of the work is justified by the need to develop solutions aimed at introducing measures to ensure energy saving and energy efficiency in the public sector. The structure and operating principle of a module of auto-selecting energy saving measures as a part of the Energy Resources Management System (SUER) are described. The work studies the quality of fitting energy-saving measures with or without using data on categorical features. An analysis of the selected categorical features, as well as a comparative analysis of their encoding methods, is carried out. An accuracy evaluation method of the classifier in the context of the work is proposed. A series of experiments were conducted by enumerating combinations of numeric and categorical data converting methods, in order to determine the significance of categorical features in general, as well as to determine the most effective combination of encoding methods. A comparative analysis of the results of the experiments was performed and the most successful model was determined, with an additional assessment of the quality of the model was made based on the metrics of precision, recall and F1-score. Conclusions were made on the advisability of supplementing the original dataset with categorical data to improve the performance of the system.

Keywords: artificial neural networks, energy saving programs, energy audit, categorical data

For citation: Stan V. K., Bukhanov D. G., Koshlich Yu. A. (2026) Improving Performance of Fitting Energy-Saving Measures of Buildings Using Artificial Neural Networks. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 5–22. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-5-22>

Повышение качества подбора энергосберегающих мероприятий зданий при использовании искусственных нейронных сетей

В. К. Стан¹⁾, Д. Г. Буханов¹⁾, Ю. А. Кошлич¹⁾

¹⁾Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова
(Белгород, Российская Федерация)

Реферат. Статья посвящена повышению энергосбережения и энергоэффективности учреждений бюджетной сферы за счет автоматизации процесса подбора энергосберегающих

Адрес для переписки

Стан Василий Константинович
Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова
ул. Костюкова, 46,
308012, г. Белгород, Российская Федерация
Тел.: +7 (4722) 30-99-64
madseal@yandex.ru

Address for correspondence

Stan Vasily K.
Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov
46, Kostyukova str.,
308012, Belgorod, Russian Federation
Tel.: +7 (4722) 30-99-64
madseal@yandex.ru

мероприятий. В качестве технологии подбора мероприятий в работе предложен классификатор, построенный на базе искусственной нейронной сети. Набор информационных признаков дополнен категориальными данными зданий учреждений. Актуальность работы обоснована необходимостью разработки решений, направленных на внедрение мер по повышению энергосбережения и энергоэффективности в бюджетной сфере. Описаны структура и принцип работы модуля автоматического подбора мероприятий по энергосбережению в составе системы управления энергетическими ресурсами (СУЭР). В работе произведены исследования качества подбора энергосберегающих мероприятий с наличием и отсутствием категориальных признаков. Произведен анализ выделенных категориальных признаков, а также сравнительный анализ методов их кодирования. Предложена методика оценки точности работы классификатора в контексте решаемой задачи. Путем перебора комбинаций методов преобразования количественных и категориальных данных проведен ряд экспериментов с целью определения значимости категориальных признаков в целом, а также определения наиболее результативного сочетания методов их кодирования. Произведен сравнительный анализ полученных результатов с определением наиболее успешной модели, для которой была произведена дополнительная оценка качества работы на базе метрик точности, отклика и средневзвешенной F-меры. Сделаны выводы о целесообразности дополнения исходного набора категориальными данными для улучшения показателей работы разработанной системы.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, программы энергосбережения, энергоаудит, категориальные данные

Для цитирования: Стан, В. К. Повышение качества подбора энергосберегающих мероприятий зданий при использовании искусственных нейронных сетей / В. К. Стан, Д. Г. Буханов, Ю. А. Кошлич // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 1. С. 5–22. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-5-22>

Introduction

A necessary condition for the development of any state is continuous economic growth, accompanied by an increasing in the consumption of resources and its consumers [1–4]. The main types of energy resources consumed by all sectors of the economy are heat and electrical energy, cold and hot-water supply, natural gas, etc. At the same time, the availability of resources in the public sector, critically important and sensitive to the level of resource provision, is affected by both the availability of the resource itself and the features of the financial policy being pursued [5–7]. Federal Law No 261-FZ “On Energy Saving and Improving Energy Efficiency, and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation”, adopted in 2009, is aimed at “creating a legal, economic and organizational framework for stimulating energy saving and improving energy efficiency” [8]. An important addition to this law is the fact that the Russian government has developed several energy strategies up to 2035 and 2050 [4].

In practice, the achievement of the set goals is ensured by conducting an energy audit of the facility with the subsequent creation and control of an energy saving program (ESP). In this case, the basis of the ESP is a set of measures, developed within the framework of the energy audit and aimed at achieving target energy saving indicators [9–11].

The study of the subject area showed that the most difficult stage of the process is the energy audit due to economic and project risks. On the one hand,

the costs of conducting research and implementing energy saving measures (ESMs) may not be recouped within the expected useful life of a building. On the other hand, classical methods of conducting energy audit do not cover all the typological groups of buildings and measures, and not excluding influence of the specialists' competencies involved in the work [12, 13].

The problem of reduction the cost of money and human resources for conducting an energy audit and the effectiveness of the proposed energy-saving measures arises. Thus, the goal of the work is to automate the fitting of ESMs. To solve the problem, a number of software systems based on artificial intelligence methods: data clustering, fuzzy logic, expert systems, genetic algorithms and methods based on the use of artificial neural networks (ANNs) have been developed. The analysis of this systems showed that there is no common solution, but at the same time, a large number of them are proposed for individual types of buildings. Also, most of the solutions considered require high resource costs for preparing data or employees to work with them [14, 15]. In view of the wide development and areas of application, when solving such problems, the work proposes to use ANN [16].

As a result, within the framework of the Energy Resources Management System (SUER) [17], an intelligent module, that performs the selection of energy-saving measures for a building within the framework of the creation of an ESP, was developed. The structure of the module is shown in Fig. 1.

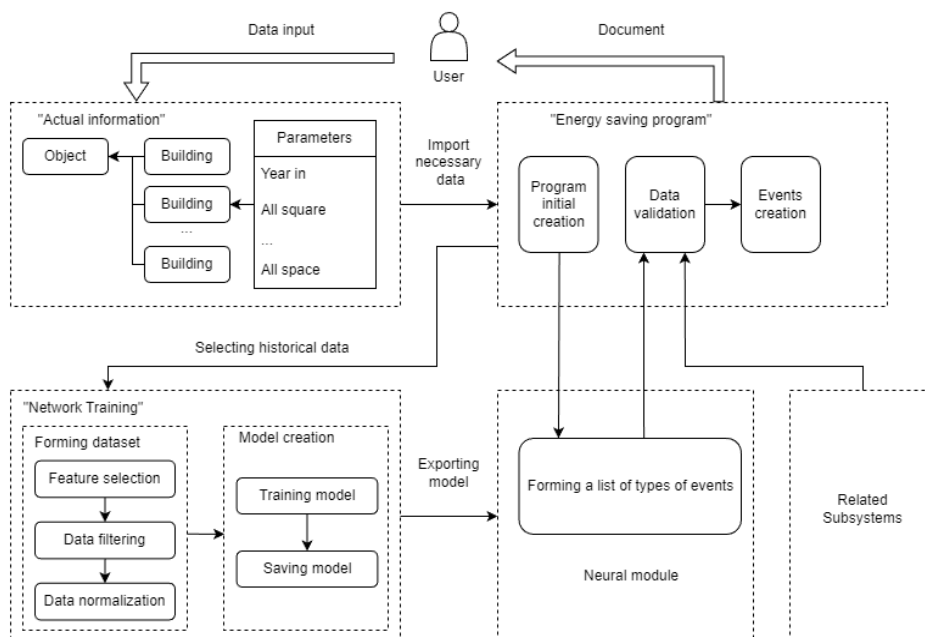


Fig. 1. Diagram of the process of operation of the subsystem of automatic selection of events of the SUER

At the initial stage, the user [User] enters data about institutions [Data Input] into the "Actual information" subsystem [Actual Information]. This data repre-

sents essential information about the institution [*Object*], as well as information on the buildings included in its structure [*Building*]. Buildings have a number of characteristics [*Parameters*], which make it possible to, directly or indirectly, evaluate them. Next, at the initial stage of the ESP generation, all the necessary information is imported from “*Actual Information*” [*Import Necessary Data*] into “*Energy Saving Programs*” [*Energy Saving Programs*]. After, a program with a basic level of filling will be created [*Program Initial Creation*]. The next stage is the generating of a list of events [*Forming a list of types of events*]: the essential information is transformed and transmitted to the input of the neural network [*Neural Module*]; the network processes the information and returns at the output a list of event types, which represents a vector of the probabilities of using a particular ESM. The received information is converted to a normal form and then undergoes verification [*Data Validation*] for the possibility of using a particular event based on data from other subsystems [*Related Subsystems*]. At the final stage, events are created and appraised [*Events Creation*] and a ready to print ESP [*Document*] can be downloaded by User [*Getting document*].

The neural network fitting process [*Network training*] should be highlighted separately. At the preliminary stage, a data sample [*Forming Dataset*] is dumped from the ESP subsystem [*Selecting Historical Data*]. This sample undergoes filtration procedures [*Data Filtering*] and normalization [*Data Normalization*] of a pre-selected set of building parameters [*Feature Selection*]. The resulting dataset is used to fit the network [*Training Model*], the result of which is a file containing its parameters and structure [*Saving Model*]. This process is continuous, since the database is constantly updated with new ESPs.

The data, which represent information on previously developed ESPs and are accumulated during the operation of the SUER, were used to train the ANN. Due to the architecture of the system it was decided to use information on the building as a part of the institution as a input data vector. At the stage of the initial formation of the sample, the following features were excluded from the general set:

- *categorical features*, since it is difficult to assess their influence within a feature on the output data and the work of the classifier: type of a building and institution, etc.;

- *numeric features* that are optional and have a low occupancy rate: width and length of a building.

Thus, a sample was formed that included about 12,000 records containing 22 numeric features at the input:

- *volumes of energy resource use*: volumes of energy resources consumed in the year preceding the year in the ESP started;

- *structural characteristics of buildings*: year built, total volume and area, useful and heated volumes and area, areas of dispersion surfaces (outwalls, attic and basement), number of windows, etc.;

- *operational characteristics of buildings*: number of employees, number of visitors.

And one output feature – a list of energy saving event type identifiers, converted using Multi-Hot Encoding.

To improve the quality of training and subsequent operation of the network, the data were cleaned and normalized. Data cleaning from outliers was performed using the Box-plot method [18] and a priori information: outliers were identified based on the specificity of a particular feature using visual classification. The result of data cleaning was the exclusion of about 2000 records from the total sample, or 17 % of the original dataset.

Data normalization was performed using min-max normalization (scaling): the result of this type of normalization is bringing the feature values into the range [0; 1] (Table 1). In the context of this work, the need to use this operation is justified by the large spread of the initial data: the values in the final sample lie in the range from 0 to $5 \cdot 10^5$.

Two methods for data normalization were chosen: linear and logarithmic scaling [19]. Linear scaling has the following form:

$$y = (x - \min(x)) / (\max(x) - \min(x)), \quad (1)$$

where y – normalized data; x – source data; $\max(x)$ and $\min(x)$ – maximum and minimum values in the sample.

Logarithmic normalization has the following form:

$$y = x - \min(x) / 10^j, \quad (2)$$

where y – normalized data; x – source data; $\min(x)$ – minimum values in the sample; j – scaling factor,

$$j = \log_{10} |\max(x) - \min(x)|. \quad (3)$$

Table 1

Example of normalized data for training a neural network

Year in	Heat consumption	Water consumption	...	All space	Windows count	Event ids
0.622951	0.025641	0.045384	...	0.042267	0.086957	4, 38, 40
0.467213	0.013704	0.002771	...	0.045721	0.060201	36, 38, 40, 41, 50, 51
...
0.54918	0.035985	0.101683	...	0.097881	0.197324	38, 41

Based on the analysis of some papers [20–23], a classifier based on feedforward neural network (multilayer perceptron) was developed. The choice of this type of network is due to its applicability in solving this type of problems (multi-label classification).

As a result, a neural network with the structure shown in Fig. 2 was developed [24, 25].

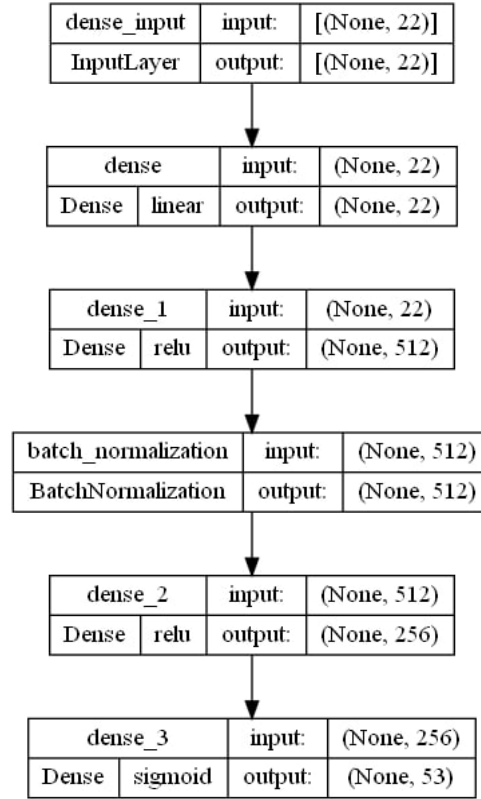


Fig. 2. Structure of the original neural network

The network implementation is done in Python 3.10 using Keras API (v2.13.1) on top of TensorFlow framework (v2.13.1), trained on Intel Core i7-12700 CPU with DDR5 SDRAM and has the following configuration code:

```

model = M.Sequential()
model.add(L.Dense(inputs, input_dim=22, activation='linear'))
model.add(L.Dense(512, activation='relu'))
model.add(L.BatchNormalization())
model.add(L.Dense(256, activation='relu'))
model.add(L.Dense(53, activation='sigmoid'))
model.compile(optimizer="adam", loss='mean_squared_error', metrics='accuracy').

```

The basic metrics for evaluating the results of classifier training are *accuracy* and *loss* function.

Accuracy is calculated as the ratio of correctly predicted values to the total number of iterations.

Loss function (error): mean squared error (MSE), calculated by the formula (4), is used:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (y - \hat{y})^2, \quad (4)$$

where \hat{y} is the predicted value, y is the real output value, n is the total number of training operations.

The results of training the developed model on numeric data using the prepared dataset are shown in Fig. 3–4.

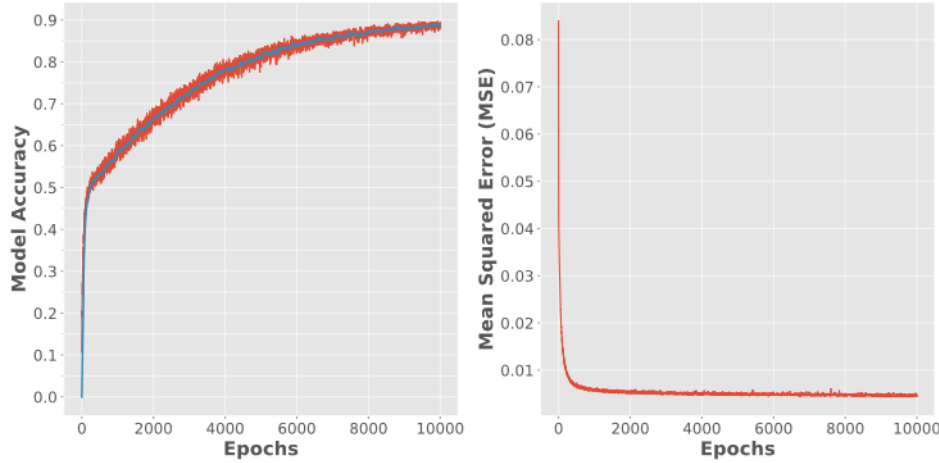


Fig. 3. Classification quality using linear scaling

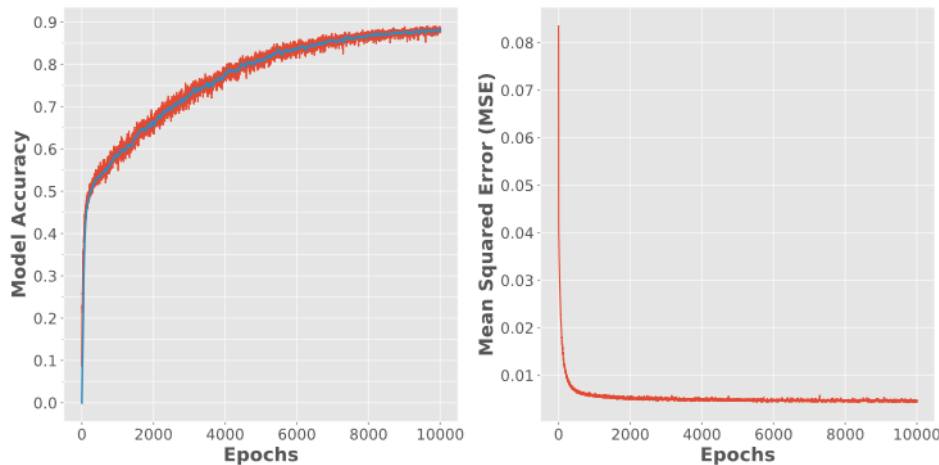


Fig. 4. Classification quality using logarithmic scaling

An assessment of the obtained results showed that the proposed approach proved its feasibility and effectiveness. However, the previously imposed restrictions on the data used in the classifier's work could have caused the lower accuracy of the network. To improve the accuracy, it is necessary to add an analysis of categorical features. This requires an assessment of the structure and quality of the data, determining their correlation with the output and numeric data, and determining the most effective method for their normalization.

Preparing for experiments

To improve the quality of classification, it was decided to supplement the dataset with categorical features. Thus, 12 categorical features were added to

the 22 numeric ones (Table 2). They contain information about the functional purpose of buildings, the presence of wall insulation, glazing area and a number of other characteristics that directly affect the energy saving characteristics of buildings, as well as the ways to improve them.

The categorical data block can be structurally divided as follows:

- *Belonging to typological groups*: type of building; type of institution in whose structure the building is included; energy efficiency class of the building; functional purpose of the building;
- *Design features*: type of attic floors and the method of their insulation; material of window units and their execution; material from which the walls are made, type of basement rooms;
- *Flags (binary features)*: technical floor, presence of facade insulation.

Table 2

Source categorical dataset sample

No	Type organization	Type building	Kee	Ext wall material	Type of building	Facade heat having	Wood window block type	Plastic window block type	Roof	Warm roof	Cellar
1	2	8	4	False	2	False	1	3	3	1	1
2	1	9	4	False	4	True	1	3	3	6	3
3	2	8	1	False	2	False	1	2	3	1	1
4	11	3	8	False	2	False	1	2	2	1	1
5	1	9	3	False	4	True	1	2	3	7	1

From the number of unique values corresponding to each of the features (Fig. 5), it is clear that the minimum number per feature was two (binary features), and the maximum was 24 (for “Type building”).

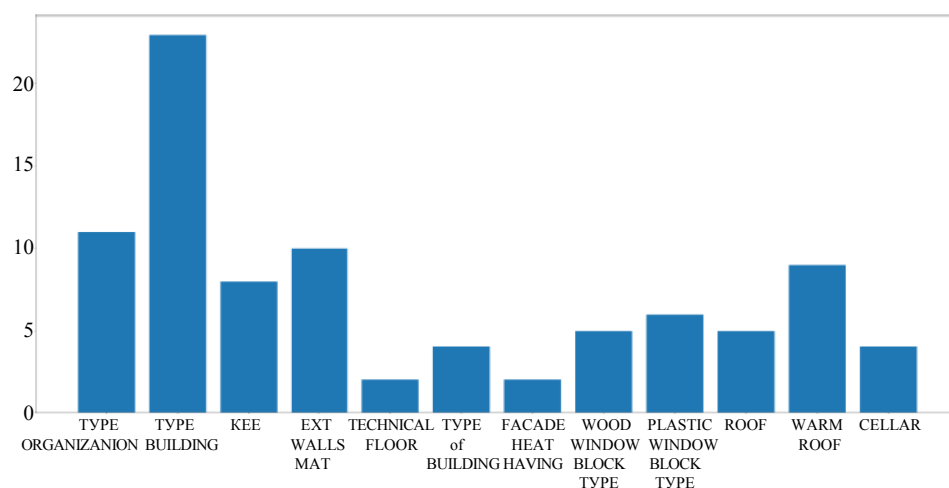


Fig. 5. Number of unique values of categorical features:
X-axis – categorical features; Y-axis – number of unique values for each feature

The specifics of the data used are also determined by the method of storing them in the database. In this case, each category is already assigned a serial number (often from 1 to N). Thus, it can be considered that the categorical data describing typological groups of building features are initially transformed using Label Encoding [26], which will be described below.

To improve the quality of the initial data for analysis, it was decided to evaluate the possibility of switching from Label Encoding to Ordinal Encoding. For this purpose, graphs of the distribution of values within each of the features were obtained (Fig. 6). Using the example of the *Type Building* feature, it can be seen that the order number in the initial data does not in any way affect the occurrence of the value in the dataset.

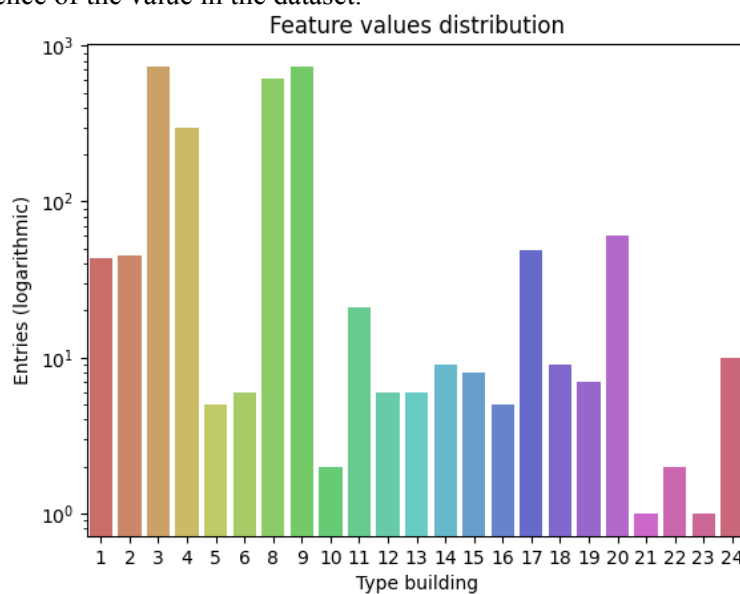


Fig. 6. Distribution of values using an example of “Type building” feature:
X-axis – serial number of a “Type building” unit; Y-axis – number of entries in logarithmic scale

Categorical data encoding

To work with categorical data, it is necessary to select the type of their transformation. There is a wide range of methods for encoding categorical data depending on the task being solved. All these methods are similar in the need to determine the set of values corresponding to the encoded feature. Let us consider the most common ones taking into account the specifics of the coded data [26–34].

One-Hot Encoding: the value of the target feature is replaced by a vector consisting of a set of zeros (0) and only one “one” (1), the position of which corresponds to the position of the feature in the set of unique values [26, 28]. There is a variation of this method called *Multi-Hot Encoding*, which allows storing the value of several features at once and is used to transform output data: a set of integer identifiers of energy saving measures is replaced by a set of ones located in the vector at indices equal to the value of the type. This method allows enco-

ding any data regardless of its type with the possibility of reverse encoding, but the number of features at the input increases in direct proportion to the number of values it receives.

Label Encoding: when using this method, each unique value of the feature is assigned an integer (sequence number). The main disadvantage of this method is the creation of redundant dependencies in the data, since from the point of view of the neural network, the place in the list determines the significance of the feature value. Most of the existing categorical features in source dataset have already encoded with it due to the specifics of storing them in the database. There is a variation of the method called *Ordinal Encoding* [26, 27, 29], the main difference of which is the compilation of a correspondence table for encoding features. Using of this approach is suitable only for ordered series, like scales of subjective assessments, and it allows you to compensate the disadvantages of Label Encoding in some degree.

Binary Encoding is a hybrid of *Label* and *One-Hot Encoding*: each of the N -unique values of a feature is assigned with an integer index, which in turn is entered into a set of binary features (just a binary representation of the labels) [26]. When using this method, the growth of the final number of features corresponds to the number of digits of the maximum value of the feature and changes according to $\log(N)$. However, while compensating for some of the disadvantages of the original methods, it inherits a number of other ones: redundancy of encoding and the creation of redundant dependencies in the data.

Frequency Encoding: it is a simple method, since the share (occurrence) of the encoded value in the dataset replaces the value of the feature in it. The advantages include the efficiency of encoding, data scalability, since the encoded values are in the range from 0 to 1, and the introduction of a dependence of the significance of the feature on the frequency of its use.

Mean Encoding / Target Encoding involves transforming a feature in accordance with the value of the target feature [26, 29, 30]. It also depends on the classification task: for regression – the average value of the target label for a given value of the encoded feature; for binary classification – the probability of a single class (event occurrence) for a given value of the encoded feature. There is a simplified version called *M-estimator Encoding* that uses a scaling factor to transform values. It also has varieties like *Leave One Out Encoding* and *CatBoost Encoding*, in which the current vector is excluded when calculating the value of the target feature. This family of methods also includes *James-Stein Encoding*, *Weight of Evidence Encoding* and its variation – *Probability Ratio Encoding*, based on comparing the encoded values with the average values of the target feature. In case of the problem being solved, using these methods have no clue, since the target feature is a set of values and encoding them into one contradicts the final goals of the multi-class classification being produced.

Hashing Encoding is similar to *Binary Encoding*, except for the fact that the number of columns (digits) is determined not by the number of unique values of the feature, but manually (usually from 1 to 100). It suits well for encoding text data, but inappropriate in this case because the encoded features are already integer.

In addition, since the original categorical data are integers, the transformation methods previously used for numeric data (linear and logarithmic

scaling) are applicable to them. It will allow to fit the data into the previously established interval [0; 1].

Ultimately, to find a solution to the problem, several methods of transforming categorical data were selected and the following experiments were conducted:

- solving a classification problem using only categorical data without any transformation and scaling to determine their value through assessing the correlation with the output;
- solving a classification problem using scaled numeric data and categorical data without transformations to assess the impact of categorical data on the accuracy of the classification process in general;
- solving a classification problem using scaled numeric data and scaled categorical data to assess the potential impact of encoding methods on classification accuracy;
- solving a classification problem using scaled numeric data and categorical data transformed using the following methods: Binary Encoding, Frequency Encoding, Helmert Encoding, Backward-Difference Encoding to identify the most effective encoding method within the framework of solving the problem.

Conducting experiments

To conduct the noted experiments, the number of perceptrons in the hidden layers was increased from 512/256 to 700/400, respectively. This was done because the graphs showed underfitting of the resulting neural network when the number of input parameters increased.

A metric for testing the quality of the model was also developed, because the standard accuracy metric used in Keras API [35] calculates accuracy by counting only full matches of values, but given the fact that the output data is an array of event types, this technique is redundant. The evaluation of the results using the developed technique is carried out in two stages:

1. Since the result of the neural network is a vector of probability estimates, the data is transformed into an “encoded” form by setting a threshold value (0.8) to assess if an ESM fits. Then the resulting set of zeros and ones is transformed into an integer series of identifiers in order to discard the comparison of missing events (0 when encoding). Thus, for example, the output vector $(1.311^{-31}, 2.764^{-17}, 1.0005^{-18}, 7.953^{-9}, 4.298^{-13}, 2.43^{-34}, 3.798^{-37}, 1.826^{-16}, 0.0, 1.795^{-29}, 2.504^{-22}, 2.276^{-17}, 0.0, 3.27^{-32}, 6.41^{-22}, 1.376^{-17}, 3.454^{-33}, 7.404^{-34}, 1.076^{-35}, 9.33^{-29}, 6.858^{-17}, 1.453^{-14}, 1.309^{-14}, 1.05^{-15}, 8.145^{-14}, 3.001^{-15}, 1.759^{-15}, 3.874^{-21}, 2.127^{-11}, 9.999^{-1}, 9.057^{-19}, 4.582^{-21}, 3.556^{-22}, 9.154^{-10}, 7.732^{-34}, 1.0, 0.0, 7.504^{-8}, 3.748^{-6}, 1.0, 7.424^{-8}, 9.99^{-1}, 5.946^{-27}, 8.385^{-11}, 1.196^{-31}, 1.041^{-10}, 1.602^{-29}, 5.995^{-14}, 1.584^{-16}, 2.241^{-13}, 4.373^{-11}, 3.383^{-33}, 5.037^{-29})$ will first take the form (0000000000 0000000000 0000000001 0000010001 0100000000 0000000000), and at the final stage it gets form like (30, 36, 40, 42);

2. The accuracy of the prediction is assessed by comparing the initial set of identifiers with those obtained as a result of the neural network: the prediction is considered successful if more than 50% of the events in the initial set are included in the predicted set (for extra events, it is assumed that they will be filtered out at the validation stage in the “Data Validation” module).

The developed metric uses a 0.8 threshold value. This number was selected empirically based on available statistical data.

To evaluate the accuracy of the work, a test data set was prepared with a number of rows corresponding to 10 % of the original dataset.

Results

As a result, a number of experiments were conducted:

Experiment 1: Using only categorical data for fitting without any transformations. The resulting graphs (Fig. 7) show a correlation between the input and output data, but it is not as strong as in the case of numeric data.

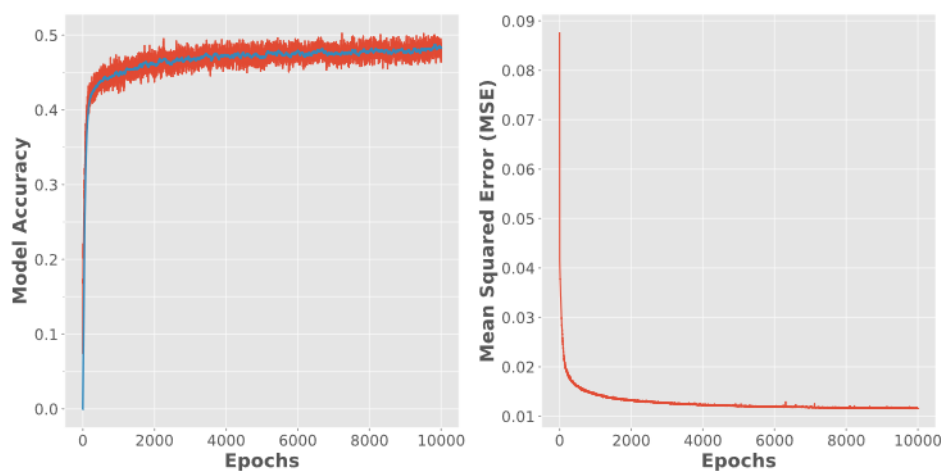


Fig. 7. Metrics of ANN fitting using only categorical data without any transformations

Experiment 2: Fitting a network using linearly scaled categorical data only (Fig. 8). The data obtained show that reducing the values to a single interval does not affect the fitting quality. The data obtained may also indicate that the serial number of categorical data unit does not correlate with its impact.

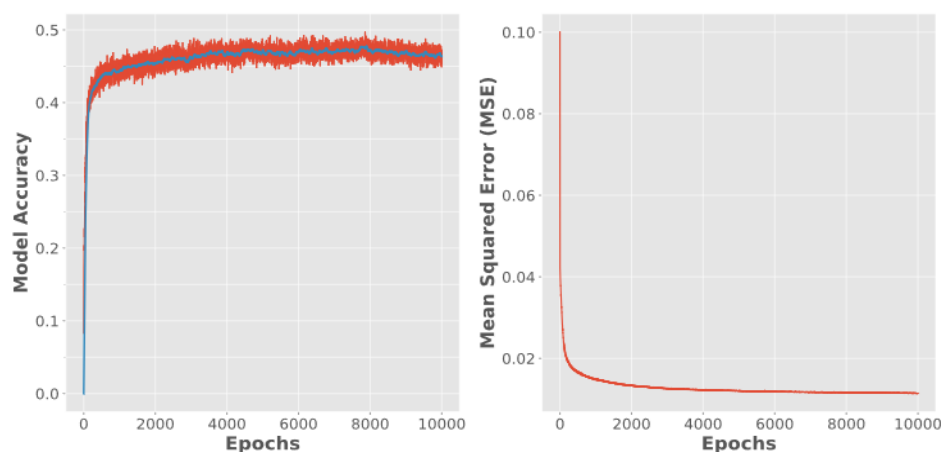


Fig. 8. Metrics of ANN fitting using transformed with linear scaling categorical data only

Experiment 3: Network fitting using numeric data with scaling and categorical data without any transformations (Fig. 9–10). Based on the results obtained, it can be concluded that the introduction of categorical data into the set, although slightly, increased the accuracy of classification.

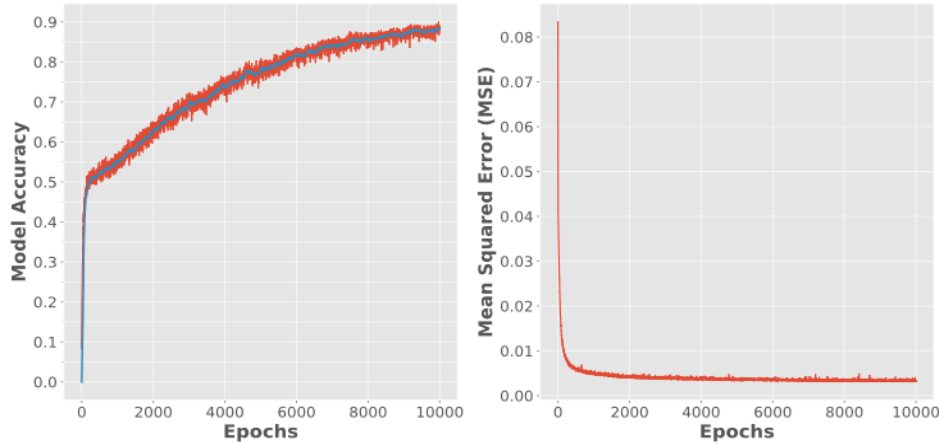


Fig. 9. Metrics of ANN fitting using linearly scaled numeric data and categorical data without any transformations

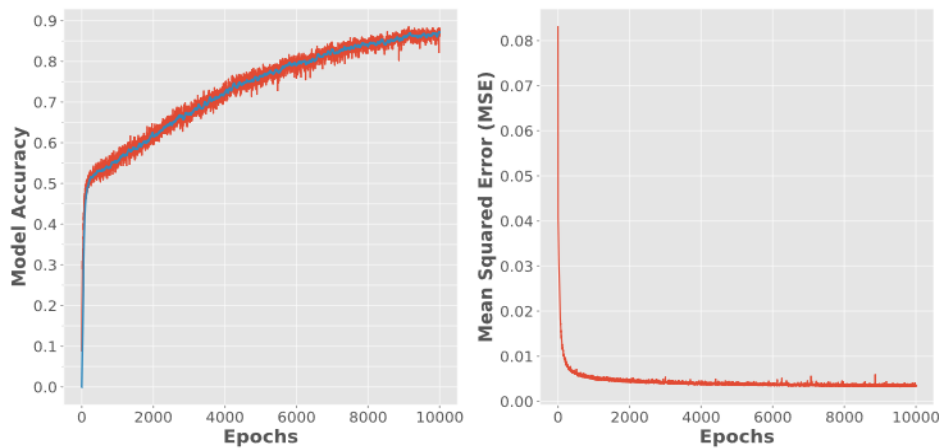


Fig. 10. Metrics of ANN fitting using logarithmically scaled numeric data and categorical data without any transformations

Experiment 4: Fitting ANN using scaled numeric data and linearly scaled categorical data (Fig. 11–12). In this case, higher classification accuracy rates are observed comparing to the previous experiment, which is probably due to the reduction of all values to a single range $[0; 1]$.

Experiment 5: Network fitting using scaled numeric data and categorical data transformed using frequency encoding (Fig. 13–14). This combination of data transformation methods allowed to achieve fitting accuracy above 0.91 in both cases, which can be considered an improvement in compare with fitting using numeric data only.

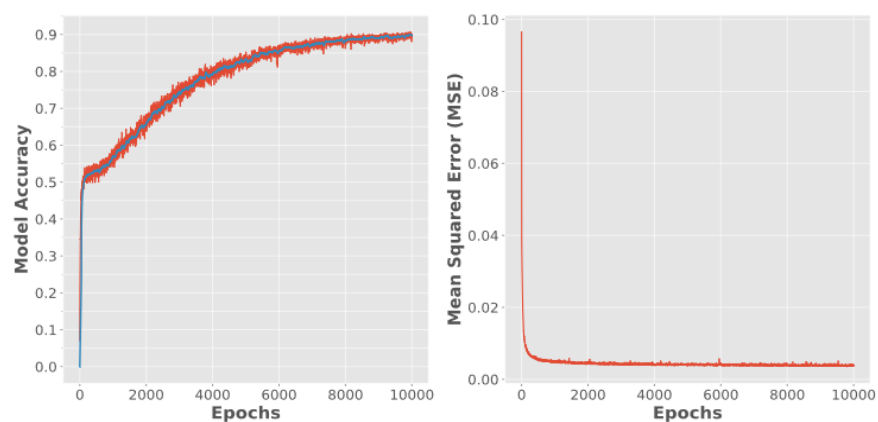


Fig. 11. Metrics of ANN fitting using linearly scaled numeric data and linearly scaled categorical data

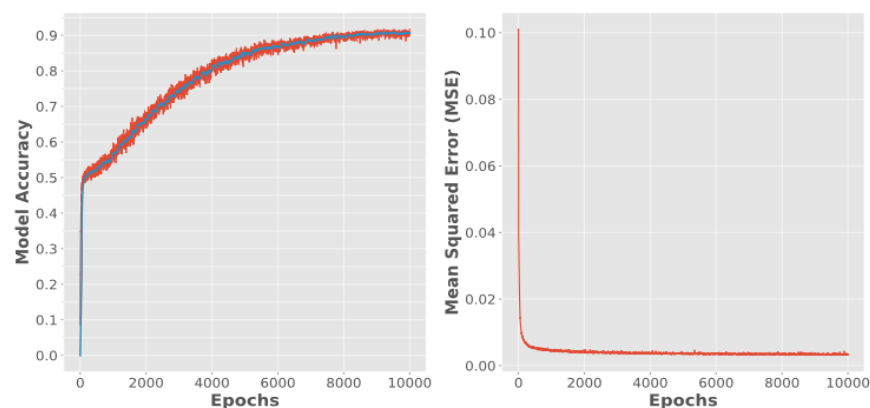


Fig. 12. Metrics of ANN fitting using logarithmically scaled numeric data and linearly scaled categorical data

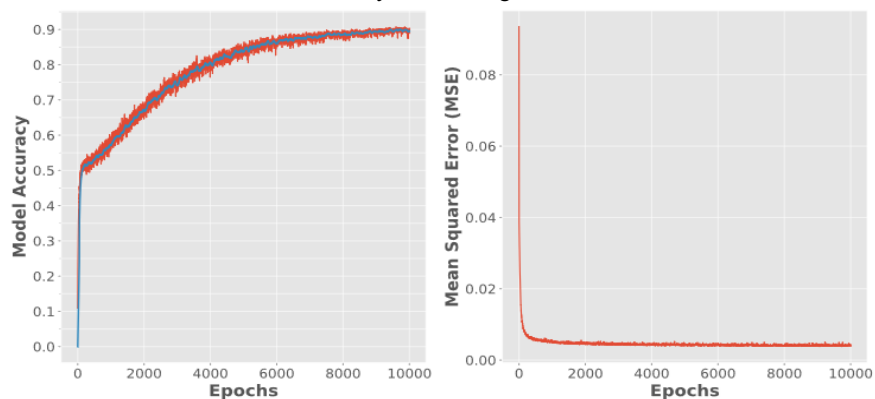


Fig. 13. Metrics of ANN fitting using linearly scaled numeric data and categorical data transformed using frequency encoding

In the case of experiments using Helmert, Backward-Difference and Binary Encoding methods, the fitting ANN using the initial model configuration fai-

led. Attempting to correct the situation by changing the model hyperparameters (its architecture, layer structure and fitting setup), as well as additional data preparation methods, did not help to fix it.

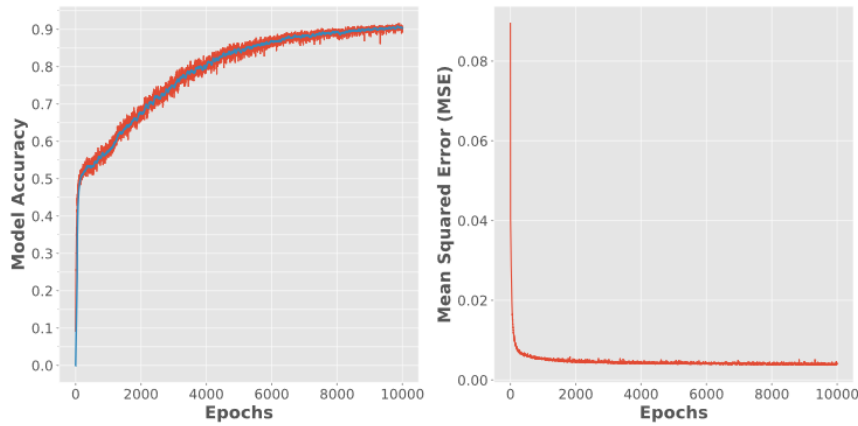


Fig. 14. Metrics of ANN fitting using logarithmically scaled numeric data and categorical data transformed using frequency encoding

The summary of the results of fitting and testing the obtained models is presented in Table 3.

Table 3

Quantitative indicators of the results of training and testing the model based on different data configurations

No	Numeric data encoding	Categorical data encoding	Model accuracy (Fitting)	Model accuracy (Testing)
1	Linear scaling	Data excluded	0.8836	0.89
2	Logarithmic scaling	Data excluded	0.872	0.86
3	Data excluded	Without converting	0.4833	0.65
4	Data excluded	Linear scaling	0.4751	0.53
5	Linear scaling	Linear scaling	0.9065	0.46
6	Logarithmic scaling	Linear scaling	0.9124	0.43
7	Linear scaling	Frequency encoding	0.9058	0.91
8	Logarithmic scaling	Frequency encoding	0.902	0.87
9	Linear scaling	Binary, Helmert, Backward-Difference Encoding	0.0051	0.0

Discussion

The analysis of the obtained results allows us to consider that categorical data have value and using it in the process of forming a set of ESMs is justified. At the same time, the significance of this data class, compared to numeric data, is significantly lower, and it is demonstrated by the accuracy of the fitting models using only numeric data (89 %) and categorical data only (65 %). It is clear, that the methods previously used to transform numeric data are not applicable to categorical data: the use of scaling on isolated categorical data did not have any effect, and when implemented, fitting on a combined dataset even reduced the accuracy of the model from 89 to 46 %.

A practical comparison of the results of using categorical data encoding methods showed that the frequency encoding method is the most effective.

At the same time, some of methods that use dummy variables turned out to be inapplicable for fitting current configuration of the classifier. On the other hand, the results of works [28, 29], show a relatively high efficiency of methods using dummy variables (One-Hot, Helmert, etc.) in solving linear regression problems. It is worth noting that these works are similar by the fact that all surveys were carried out for problems of single-class, and sometimes binary, classification, in contrast to the multi-class classification used in this work.

The highest classification accuracy (91 %) was obtained for the model combining linear scaling of numeric data with frequency encoded categorical data. The calculated values of the Precision, Recall and F1-score metrics for this model have values 0.75, 0.778 and 0.757 respectively [36, 37]. These indicators can be considered acceptable, given the presence of a “Data validation” block at the output of the classifier. However, it is worth accepting the fact that the value of the Recall indicator, which is primary important in view of the need to provide the user with a greater number of possible ESMs, does not significantly exceed Precision and there is a sense in refining the model by increasing this indicator.

However, the question of the possibility and correctness of using methods of categorical data encoding that using dummy variables in solving the problem under study remains open. Possible reasons for such an outcome may be the fact that splitting one feature into several new ones entails introducing a large number of zeros and other constant values into the set. So, with the original number of features equal to 12, when using Binary Encoding, their number becomes equal to 59, and 99 when using Helmert or Backward-Difference Encoding, which also exceeds the total number of features in the original set equal to 34. Considering the small number of numeric features in the source dataset (22) and their normalization to the interval [0; 1], adding 89 new features (that is how many unique values all categorical features contain in general) consisting of zeros and ones makes the classification problem unsolvable.

CONCLUSION

As a result of the work, a dataset was formed from not only numeric, but also categorical data. The most suitable methods of data encoding, depending on their type, were determined experimentally: for numeric data – cleaning from outliers and scaling, for categorical data – frequency coding.

As a result of the experiments, the highest classification accuracy (91 %) was demonstrated by a combination of linear scaling of numeric data with frequency encoding of categorical data. Also, it demonstrates that introducing categorical data into the dataset, it became possible to achieve an actual increase in accuracy of 2 % compared to linear scaling without implementing categorical features, which can be considered a satisfactory result.

Acknowledgments

This work was supported by the “Priority 2023” Federal University Funding Program. The authors would also like to gratefully acknowledge High-Technology Center of BSTU named after V. G. Shukhov for provision of equipment for the research.

REFERENCES

1. Nekrasov S. A. (2023) Stimulating Electricity Consumption in Outsider Regions is a Necessary Condition for the Structural Stability of Russia. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Edu-*

- cation Institutions and Power Engineering Associations, 66 (2), 186–200 (accessed 13 November 2024). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-186-200> (in Russian).
2. Total energy consumption. *Enerdata*. Available at: <https://energystats.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>. (accessed 15 May 2024).
 3. Electrical Balance and Electrical Energy Consumption in the Russian Federation From 2005 to 2022. *Federal State Statistics Service*. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/elbalans_2022.xlsx. (accessed 15 May 2024) (in Russian).
 4. Senshinova E. V., Zhuravlev A. E. (2021) Growth in Energy Consumption as One of the Challenges of the 21st Century. *Novaya nauka v novom mire: filosofskoe, sotsial'no-ekonomicheskoe, kul'turologicheskoe osmyslenie: Sbornik statei VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Petrozavodsk, 27 maya 2021 goda* [New science in the new world: philosophical, socio-economic, culturalological understanding: Collection of articles of the VIII International scientific and practical conference, Petrozavodsk, May 27, 2021]. Petrozavodsk, 78–82 (in Russian).
 5. Poletaev I. Yu., Androshina I. S. (2023) Formation of the Goals and Objectives of the New State Program for Energy Conservation and Energy Efficiency Improvement of the Russian Economy. *Herald of Russian Academy of Natural Sciences = Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk*, 23 (2), 120–124 (in Russian). <https://doi.org/10.52531/1682-1696-2023-23-2-120-124>.
 6. Antonov A. N., Ryzhov G. A. (2010) Actual Issues of Increasing Efficiency and Investment Support for Energy Saving Programs at the Level of Municipalities in Russia. *Sovremennye tendentsii v ekonomike i upravlenii: novyi vzglyad. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ch. 1* [Modern trends in economics and management: a fresh approach. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference. P. 1]. Novosibirsk, 59–66 (in Russian).
 7. Ratner S. V. (2013) Issues of Practical Implementation of State Economic Policy in the Field of Energy Efficiency. *Economic analysis: theory and practice*, (29), 21–28 (in Russian).
 8. *On Energy Saving and Improving Energy Efficiency, and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation*: Federal Law, 23.11.2009, No. 261, as amended in 13.06.2023. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=500643> (in Russian).
 9. Nevokshenov A. Yu., Udovik A. V., Yurkovskaya G. I. (2015) Factors Influencing the Implementation of Energy Efficiency Programs and Energy Efficiency of Industrial Enterprises. *Sovremennye problemy ekonomicheskogo i sotsial'nogo razvitiya: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 11* [Modern problems of economic and social development. Interuniversity collection of scientific papers. Iss. 11]. Krasnoyarsk, 32–34 (in Russian).
 10. Lukishina L. V., Anisimov T. Yu., Mustafina O. N. (2017) Features of the Development of Energy Saving and Energy Efficiency Programs in the Context of Innovative Development of the Russian economy. *Innovatsionnoe razvitie rossiiskoi ekonomiki: materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 25–27 oktyabrya 2017 g. T. 2* [Innovative development of the Russian economy: Proceedings of the X International scientific and practical conference: in five volumes, Moscow, October 25–27, 2017. Vol. 2]. Moscow, Plekhanov Russian University of Economics, 272–275 (in Russian).
 11. Lebedeva N. A., Poletaeva L. P., Svezhintsev P. S. (2018) Adaptive Approach to the Formation of an Energy Saving Program. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Intellect. Innovations. Investments*, (10), 24–27 (in Russian).
 12. Li C. Z., Zhang L., Liang X., Xiao B., Tam V. W. Y., Lai X., Chen Z. (2022) Advances in the Research of Building Energy Saving. *Energy and Buildings*, 254, 111556. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111556>.
 13. Mohsen M. S., Akash B. A. (2001) Some Prospects of Energy Savings in Buildings. *Energy Conversion and Management*, 42 (11), 1307–1315. [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(00\)00140-0](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(00)00140-0).
 14. Popescu D., Bienert S., Schützenhofer C., Boazu R. (2012) Impact of Energy Efficiency Measures on the Economic Value of Buildings. *Applied Energy*, 89 (1), 454–463. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.015>.
 15. Song K., Ahn Y., Ahn J., Kwon N. (2019) Development of an Energy Saving Strategy Model for Retrofitting Existing Buildings: A Korean Case Study. *Energies*, 12 (9), 1626. <https://doi.org/10.3390/en12091626>.
 16. Farkhutdinov R. R. (2017) Energy Saving Tools and their Application within the Framework of Regional Development Programs. *Alleya nauki = Alley of Science*, 3 (13), 555–559 (in Russian).
 17. Koshlich Yu., Belousov A., Trubaev P., Grebenik A., Bukhanov D. (2020) Control Systems of Regional Energy Resources as a Digital Platform for Smart Cities. da Silva Bartolo P. J., da Silva F. M., Jaradat S., Bartolo H. (eds.). *Industry 4.0 – Shaping The Future of The Digital World*. London, CRC Press, 309–313. <https://doi.org/10.1201/9780367823085-54>.

18. Kuzmin A. M., Vysokovskaya E. A. (2019) The span Diagram is One of the Tools for Statistical Data Processing. *Metody menedzhmenta kachestva = Methods of Quality Management*, (11), 39 (in Russian).
19. Starovoytov V. V., Golub Yu. I. (2021) Data Normalization in Machine Learning. *Informatics*, 18 (3), 83–96 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96>.
20. Ascione F., Bianco N., De Stasio C., Mauro G. M., Vanoli G. P. (2017) Artificial Neural Networks to Predict Energy Performance and Retrofit Scenarios for any Member of a Building category: A Novel Approach. *Energy*, 118, 999–1017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.126>.
21. Mokrousova E. S., Romodin A. V. (2010) The issue of Creation of a Mathematical Model of an Artificial Neural Network Within the Framework of the Development of an Automated System for Managing Energy Saving Programs. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Bulletin of the Perm State Technical University. Electrical engineering, information technology, control systems*, (4), 72–76 (in Russian).
22. 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 (accessed 13 November 2024). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249> (in Russian).
23. Zhang H., Feng H., Hewage K., Arashpour M. (2022) Artificial Neural Network for Predicting Building Energy Performance: A Surrogate Energy Retrofits Decision Support Framework. *Buildings*, 12 (6), 829. <https://doi.org/10.3390/buildings12060829>.
24. Albon C. (2018) *Machine Learning with Python Cookbook*. O'Reilly Media. 364.
25. Grus J. (2019) *Data Science from Scratch First Principles with Python*. O'Reilly Media. 403.
26. Categorical Variable Encoding. *Kaggle*. Available at: <https://www.kaggle.com/code/harishvutukuri/categorical-variable-encoding> (accessed 13 June 2024).
27. Processing of Categorical Features. *Habr*. Available at: <https://habr.com/ru/articles/666234/> (accessed 13 June 2024) (in Russian).
28. Potdar K., Taher S., Chinmay D. (2017) A Comparative Study of Categorical Variable Encoding Techniques for Neural Network Classifiers. *International Journal of Computer Applications*, 175 (4), 7–9. <https://doi.org/10.5120/ijca2017915495>.
29. Novikova D. V. (2022) Comparative Analysis of the Effectiveness of Methods for Coding categorical Variables in the Problem of Predicting the Safety of Therapy for Multiple Sclerosis. *Zametki po informatike i matematike: Sbornik nauchnykh statei. Vyp. 14* [Notes on computer science and mathematics: Collection of scientific articles. Vol. 14]. Yaroslavl, Yaroslavl State University named after P.G. Demidov, 61–69 (in Russian).
30. Barkov D. V., Senotova S. A. (2021) Encoding of Categorical Features in Neural Networks. *Scientific Papers Collection of the Angarsk State Technical University*, 2021 (1), 3–8. <https://doi.org/10.36629/2686-7788-2021-1-1-3-8> (in Russian).
31. Dong G., Liu H. (2018) *Feature Engineering for Machine Learning and Data Analytics*. CRC Press. 400. <https://doi.org/10.1201/9781315181080>.
32. Zheng A., Casari A. (2018) *Feature Engineering for Machine Learning: Principles and Techniques for Data Scientists*. O'Reilly Media. 215.
33. Ilyukovich-Strakovskaya A. M. (2015) Methods of Handle Categorical Features in Classification Problem. *Informatsionno-telekommunikatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie vysokotekhnologichnykh sistem: materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Moskva, 20–24 aprelya 2015 g.* [Information and telecommunication technologies and mathematical modeling of high-tech systems: Proceedings of the All-Russian conference with international participation, Moscow, April 20–24, 2015]. Moscow, Peoples' Friendship University of Russia, 137–139 (in Russian).
34. Ezukwoke K. I. (2023) *Data Transformation for Machine Learning*. Available at: https://www.academia.edu/40436475/Data_Transformation_for_Machine_Learning.
35. *Keras API*. Available at: <https://keras.io/> (accessed 22 June 2024).
36. *Scikit-learn*. Available at: <https://scikit-learn.org> (accessed 22 June 2024).
37. Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. (2006) Beyond Accuracy, F-Score and ROC: A Family of Discriminant Measures for Performance Evaluation. Sattar A., Kang Bh. (eds). *AI 2006: Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4304. Springer, Berlin, Heidelberg, 1015–1021. https://doi.org/10.1007/11941439_114.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-23-33>

УДК 621.316.925

Определение текущей частоты в цифровых органах релейной защиты

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

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

Реферат. В цифровых органах релейной защиты в качестве полезной информации используются сигналы основной гармоники. Для их выделения из сложных входных токов и напряжений защищаемого объекта применяются нерекursивные цифровые фильтры Фурье. Полученные в результате фильтрации сигналы являются базой для определения информационных параметров контролируемых цифровыми органами величин. При номинальной частоте в энергосистеме информационные параметры вычисляются без дополнительной погрешности. В случае отклонения частоты от номинальной в силу ряда причин в информационных параметрах контролируемых величин появляется дополнительная составляющая погрешности. Когда колебания частоты незначительны, указанная составляющая несущественна и на практике ею можно пренебречь. При заметных отклонениях частоты в энергосистеме дополнительная составляющая погрешности в информационных параметрах может негативно сказаться на работе функциональных алгоритмов релейной защиты. Один из путей решения данной проблемы – коррекция указанной составляющей при отклонении частоты от номинальной. Для ее осуществления необходимо располагать результатами оценки частоты. Наиболее рациональным для целей коррекции частотной составляющей погрешности представляется использование текущей частоты. Определение указанной частоты переменного тока заключается в измерении мгновенной частоты в разные моменты времени и усреднении этих значений за определенный интервал. Мгновенная частота вычисляется по мгновенному значению динамического косинуса угла выборки, для определения которого разработаны и исследованы два функциональных алгоритма. В основе первого из них лежит использование трех последовательных значений одного из пары ортогональных сигналов. Второй алгоритм реализуется по двум смежным значениям каждого из взаимно ортогональных сигналов. Результаты выполненных исследований показали, что разработанные алгоритмы определения текущей частоты в цифровых органах релейной защиты обеспечивают ее получение с приемлемой достоверностью в диапазоне изменения 47–51 Гц при скорости изменения до 4 Гц/с.

Ключевые слова: цифровые органы релейной защиты, текущая частота, мгновенная частота, динамический косинус, функциональный алгоритм, модель, вычислительный эксперимент, MATLAB-Simulink, результаты исследований

Для цитирования: Романюк, Ф. А. Определение текущей частоты в цифровых органах релейной защиты / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 1. С. 23–33. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-23-33>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Determining the Current Frequency in Digital Relay Protection Devices

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

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

Abstract. In digital relay protection devices, fundamental harmonic signals are used as useful information. To isolate them from complex input currents and voltages of the protected object, non-recursive digital Fourier filters are used. The signals obtained as a result of filtering are the basis for determining the information parameters of the quantities controlled by digital organs. At the nominal frequency in the power system, the information parameters are calculated without additional error. In the event of a frequency deviation from the nominal value due to a number of reasons, an additional error component appears in the information parameters of the controlled values. When there are minor frequency fluctuations, the specified component is insignificant and can be neglected in practice. In case of significant frequency deviations in the power system, the additional component of error in the information parameters can negatively affect the operation of the functional algorithms of the relay protection. One of the ways to solve this problem is to correct the specified component when the frequency deviates from the nominal one. To implement this, it is necessary to have the results of frequency assessment. The most rational way to correct the frequency component of the error is to use the current frequency. Determining the specified frequency of alternating current consists of measuring the instantaneous frequency at different points in time and averaging these values over a certain interval. The instantaneous frequency is calculated from the instantaneous value of the dynamic cosine of the sampling angle, for the determination of which two functional algorithms have been developed and studied. The first of these is based on the use of three consecutive values of one of a pair of orthogonal signals. The second algorithm is implemented using two adjacent values of each of the mutually orthogonal signals. The results of the conducted studies showed that the developed algorithms for determining the current frequency in digital relay protection devices ensure its receipt with acceptable reliability in the range of 47–51 Hz at a change rate of up to 4 Hz/s.

Keywords: digital relay protection devices, current frequency, instantaneous frequency, dynamic cosine, functional algorithms, model, computational experiment, MATLAB-Simulink, research results

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2026) Determining the Current Frequency in Digital Relay Protection Devices // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 23–33. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-23-33> (in Russian)

Введение

В цифровых органах релейной защиты (ЦО) в качестве полезной информации, как правило, используются сигналы основной гармоники [1]. Для их выделения из сложных входных токов и напряжений защищаемого объекта преимущественно применяются нерекурсивные цифровые фильтры (ЦФ) Фурье и их различные вариации [2, 3]. По выборкам полученных в результате цифровой фильтрации сигналов вычисляются информационные параметры контролируемых ЦО величин.

При номинальной частоте в энергосистеме указанные информационные параметры определяются без дополнительной погрешности. В случае отклонения частоты от номинальной количество выборок входного сигнала за период оказывается не целым числом, а дискретизация становится асин-

хронной [1]. Это порождает появление в информационных параметрах контролируемых величин дополнительной составляющей погрешности, которую будем называть частотной. При незначительных колебаниях частоты в энергосистеме, имеющих место в нормальном режиме, частотная составляющая погрешности незначительна и на практике ею можно пренебречь. В аварийных ситуациях отклонения частоты от номинальной могут быть значительными. Такие режимы должны предотвращаться системами противоаварийной и режимной автоматики [5], которые обеспечивают возврат колебаний частоты в допустимые пределы. Однако в силу различных факторов указанные системы могут не подействовать. Возрастающая при этом частотная составляющая погрешности может существенно исказить информационные параметры контролируемых ЦО величин. В результате создается реальная возможность возникновения нарушений в работе функциональных алгоритмов релейной защиты.

Одним из путей решения данной проблемы является коррекция частотной составляющей погрешности при уходе частоты от номинального значения.

В основе реализации данного подхода лежит непосредственная или косвенная оценка частоты с последующим ее использованием для осуществления коррекции.

Основная часть

Для целей коррекции частотной составляющей погрешности информационных параметров величин, контролируемых ЦО релейной защиты, требуется оперативное определение частоты переменного тока. Это означает быстрое и точное измерение текущей частоты в реальном времени и с минимальной задержкой.

Для получения частоты переменного тока в реальном времени цифровыми методами преимущественно используются два основных подхода: метод прямого счета импульсов и метод обратного счета импульсов [6]. Необходимо отметить, что эти методы достаточно сложны в реализации и их применение для решения задачи коррекции частотной составляющей погрешности не является целесообразным.

Текущую частоту переменного тока, когда она меняется, можно оперативно определить путем измерения мгновенной частоты в разные моменты времени и усреднения этих значений за определенный интервал. Мгновенная частота представляет собой скорость изменения фазы указанного тока в конкретный момент времени [6]. Наиболее просто ее можно оценить на основе разности фаз сигнала между соседними дискретными значениями, которая в сущности является углом выборки $\Delta\varphi_n$:

$$f_{in} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\varphi_n}{\Delta t}, \quad (1)$$

где Δt – шаг дискретизации.

Для определения $\Delta\varphi_n$ можно воспользоваться мгновенным значением динамического косинуса угла выборки $C_{in} = \cos\Delta\varphi_n$, являющегося параметром, когда имеет место изменение указанного угла во времени. Принимая во внимание, что входные токи и напряжения ЦО релейной защиты в результате их цифровой фильтрации преобразуются в гармонические и, как правило, представляются парой ортогональных составляющих (ОС) основной частоты, рассмотрим два алгоритма получения значений C_{in} .

В первом алгоритме мгновенное значение динамического косинуса угла выборки вычисляется по трем последовательным выборкам x_n, x_{n-1}, x_{n-2} одной из ОС, зафиксированным через шаг Δt [8–11]:

$$C_{in} = \frac{x_n + x_{n-2}}{2x_{n-1}}. \quad (2)$$

Очевидно, что когда выборка x_{n-1} равна 0, определение C_{in} не представляется возможным. В этом случае C_{in} вычисляется по (2) с использованием таких же выборок другой ОС. Критерием наступления такой ситуации может служить выполнение условия $\frac{|x_{n-1}|}{X_{mn}} < x_{\min}$, где X_{mn} – амплитуда сигнала;

x_{\min} – минимально допустимое относительное значение выборки. Следует отметить, что данный алгоритм сохраняет работоспособность при угле сдвига фаз между ОС, отличном от $\pi/2$, что важно в условиях изменения частоты. Его собственное быстродействие при учете основных факторов оценивается двумя шагами дискретизации Δt .

Второй алгоритм определения мгновенного значения динамического косинуса угла выборки предполагает использование двух последовательных выборок x_n, x_{n-1} одной из ОС и значения указанного косинуса с предыдущего шага расчета $C_{i(n-1)}$. По вышеназванным величинам вычисляется мгновенное значение динамического синуса угла выборки $S_{i(n-1)}$

$$S_{i(n-1)} = \sqrt{1 - C_{i(n-1)}^2} \quad (3)$$

и формируется дополнительный сигнал x_{dn}

$$x_{dn} = \frac{x_{n-1} - x_n C_{i(n-1)}}{S_{i(n-1)}}, \quad (4)$$

который ортогонален сигналу выбранной ОС x_n при частоте в конкретный момент времени.

Благодаря этому угол сдвига фаз между сигналами x_n и x_{dn} равен $\pi/2$ и остается постоянным при изменении частоты.

Мгновенное значение динамического косинуса угла выборки определяется по разности фаз между соседними выборками $\varphi_n - \varphi_{n-1}$. Принимая во внимание, что $C_{in} = \cos(\varphi_n - \varphi_{n-1})$, его величину можно вычислить по выборкам x_n, x_{n-1} и $x_{dn}, x_{d(n-1)}$

$$C_{in} = \frac{x_n x_{n-1} + x_{dn} x_{d(n-1)}}{x_n^2 + x_{dn}^2}. \quad (5)$$

Отличительной особенностью данного алгоритма является необходимость формирования дополнительного сигнала, ортогонального исходному при частоте, имеющей место на расчетном интервале. Его быстроедействие такое же, как у первого алгоритма при гармоническом сигнале.

Выражения (2), (5) позволяют получать достоверные мгновенные значения динамического косинуса угла выборки при гармонических сигналах. Из-за искажения формы указанных сигналов под воздействием различных факторов C_{in} может определяться с большими погрешностями и возникающими при этом выбросами C_{in} . Для их ограничения устанавливается диапазон контролируемых значений C_{in} . При выходе мгновенным значением динамического косинуса угла выборки за установленные пределы C_{in} присваивается величина, равная $\cos(100\pi\Delta t)$.

В результате выполненных исследований подтверждена целесообразность определения текущей частоты не путем измерения ее мгновенной величины и усреднения результатов за определенный интервал, а посредством вначале усреднения мгновенных значений динамического косинуса угла выборки за принятый временной промежуток с последующим вычислением контролируемой частоты. Наиболее простым решением для получения усредненной величины динамического косинуса $C_{cp\ n}$ является использование для этой цели ЦФ скользящего среднего [4].

Текущая частота $f_{cp\ n}$ определяется по значению $C_{cp\ n}$

$$f_{cp\ n} = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arccos C_{cp\ n}. \quad (6)$$

Организация и проведение вычислительного эксперимента

Оценка эффективности определения текущей частоты предложенными алгоритмами проводилась с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink [12–14].

На рис. 1 приведена укрупненная структура модели. Она содержит 10 подсистем, в каждой из которых выполняются рассмотренные выше операции, и состоит из стандартных блоков библиотеки MATLAB-Simulink. Выходные порты подсистем на рис. 1 имеют такие же обозначения сигналов, как в математических выражениях, используемых в настоящей работе.

Тестовое воздействие на систему формируется в блоке «Вх. сигнал». Он позволяет воспроизводить рабочий, аварийный и послеаварийный режимы в форме как идеального синусоидального сигнала с возможностью изменения в каждом из перечисленных режимов амплитуд, фазовых сдвигов и частот, так и сигнала с наличием в нем высших гармоник, апериодической составляющей, а также синусоидальных колебаний, частота которых линейно изменяется во времени.

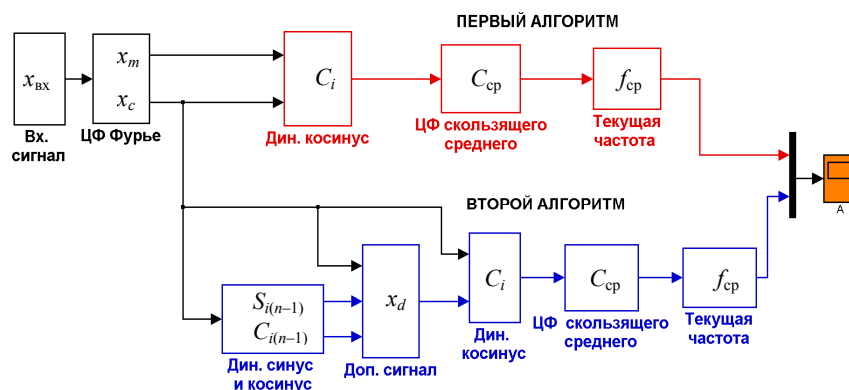


Рис. 1. Структура модели

Fig. 1. Model structure

В подсистеме «ЦФ Фурье» определяются синусная и косинусная ОС, из которых в дальнейшем используются косинусная x_c , а также амплитуда X_{mn} основной гармоники входного сигнала.

Блоки «Вх. сигнал», «ЦФ Фурье» и осциллограф А являются общими для обоих алгоритмов определения частоты.

Для первого алгоритма используются три блока. В блоке «Дин. косинус» реализуется выражение (2) для определения мгновенного значения динамического косинуса C_i по трем выборкам косинусной ОС с учетом деления на нуль при $x_{n-1} = 0$. Далее в блоке «ЦФ скользящего среднего» по шести отсчетам C_i формируется усредненное значение C_{sr} , а в блоке «Текущая частота» по величине C_{sr} согласно выражению (6) определяется текущая частота входного сигнала.

Второй алгоритм определения текущей частоты содержит пять блоков. В блоке «Дин. синус и косинус» определяется динамический косинус с предыдущего шага расчета $C_{i(n-1)}$, а по формуле (3) – динамический синус $S_{i(n-1)}$. По двум последовательным выборкам косинусной ОС, а также значениям $S_{i(n-1)}$ и $C_{i(n-1)}$ согласно выражению (4) в блоке «Доп. сигнал» формируется ортогональный косинусному дополнительный сигнал x_{dn} . Мгновенное значение динамического косинуса C_{in} по выражению (5) формируется в блоке «Дин. косинус». Блоки «ЦФ скользящего среднего» и «Текущая частота» аналогичны подобным блокам в первом алгоритме.

Результаты исследования

Расчет частоты при различной скорости ее изменения и неизменном входном сигнале. Предложенные алгоритмы ориентированы на определение частоты в диапазоне 47–51 Гц. При необходимости указанный диапазон может быть расширен. Однако это будет сопровождаться потерей точности главным образом в переходных режимах. На рис. 2 приведены результаты определения частоты $f(t)$ в указанном диапазоне при скорости

ее изменения 4 Гц/с (рис. 2а) и в диапазоне 49–50 Гц при скорости ее изменения 1 Гц/с (рис. 2б) для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) алгоритмов. В обоих случаях как первый, так и второй алгоритм вычисляют текущую частоту с достаточной точностью, однако первый алгоритм дает практически линейную зависимость $f(t)$, в то время как результаты расчетов частоты по второму алгоритму сопровождаются разбросом значений тем большим, чем больше частота отличается от номинальной.

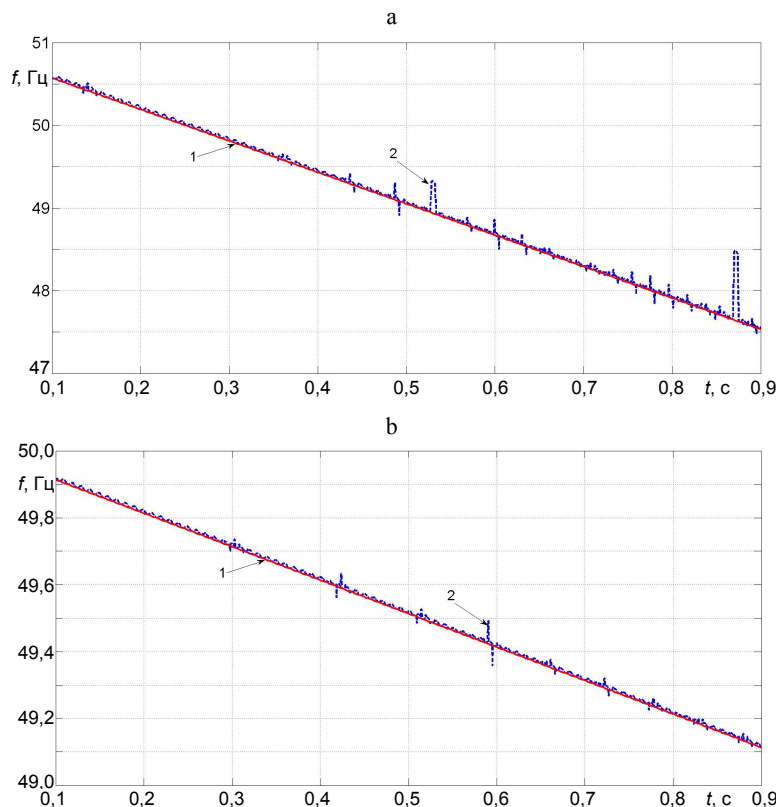


Рис. 2. Результаты определения частоты $f(t)$ при скорости ее изменения 4 Гц/с (а) и 1 Гц/с (б) для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) алгоритмов

Fig. 2. Results of determining the frequency $f(t)$ at a rate of change of 4 Hz/s (a) and 1 Hz/s (b) for the first (curve 1) and the second (curve 2) algorithms

Расчет частоты сигнала, содержащего переходный процесс различной интенсивности. Для всех рассматриваемых ниже режимов входной сигнал изменяется во времени следующим образом. В промежутке времени $t = 0-0,1$ с моделируется нормальный режим, в промежутке $t = 0,1-0,4$ с – аварийный режим, уровень сигнала которого в 10 раз выше нормального режима, и в диапазоне времени $t = 0,4-0,5$ с – послеаварийный режим с уровнем доаварийного сигнала. Для определения момента включения гармонического сигнала, при котором частота в переходном режиме вычисляется с наибольшей погрешностью, была проведена серия расчетов

в диапазоне изменения фазы включения $\varphi = 0\text{--}180$ градусов с шагом 15 градусов (рис. 3а, б). Как видно из рисунков, один из вариантов угла включения, дающий наихудший результат для обоих алгоритмов $\varphi = 0^\circ$, принят для дальнейших расчетов.

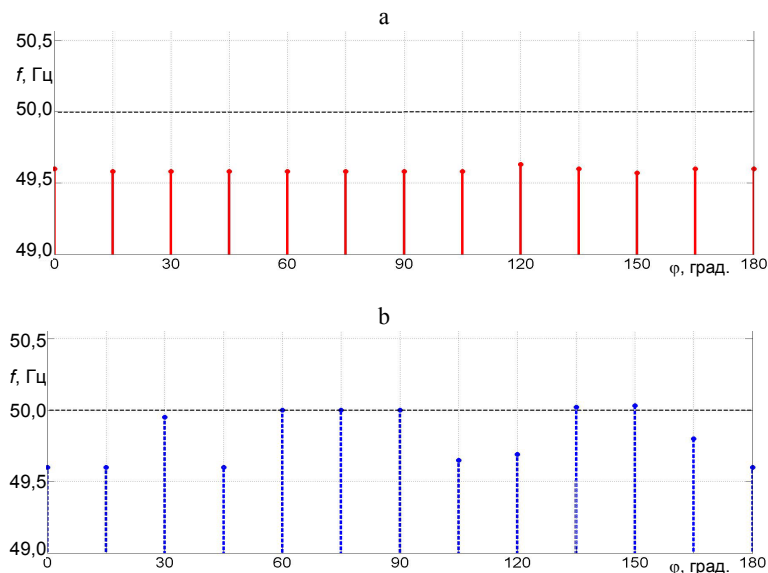


Рис. 3. Отличия расчетной частоты f от номинальной при включении синусоидального сигнала с различной фазой φ :
а – первый алгоритм; б – второй алгоритм

Fig. 3. Differences between the calculated frequency f and the nominal frequency when a sinusoidal signal with different phase φ is applied:
а – first algorithm; б – second algorithm

Сравнивая результаты моделирования, представленные на рис. 4 и 5, можно утверждать, что текущая частота при синусоидальном воздействии определяется по обоим алгоритмам практически одинаково за время, не превышающее 1 период промышленной частоты, и с приемлемой погрешностью расчета. При несинусоидальном сигнале точное определение текущей частоты затягивается на время затухания аperiodической составляющей, причем значения частоты по второму алгоритму сопровождаются значительными колебаниями по сравнению с первым алгоритмом.

К достоинству второго алгоритма следует отнести пусть и незначительное, но увеличение быстродействия при синусоидальном воздействии в переходном режиме. На рис. 6 представлен увеличенный фрагмент зависимости $f(t)$ при угле включения $\varphi = 45^\circ$. Как видно из рисунка, после короткого замыкания в момент времени $t = 0,1$ с время определения текущей частоты t_2 по второму алгоритму несколько меньше, чем время определения частоты t_1 по первому алгоритму.

Режим 1. Синусоидальный сигнал

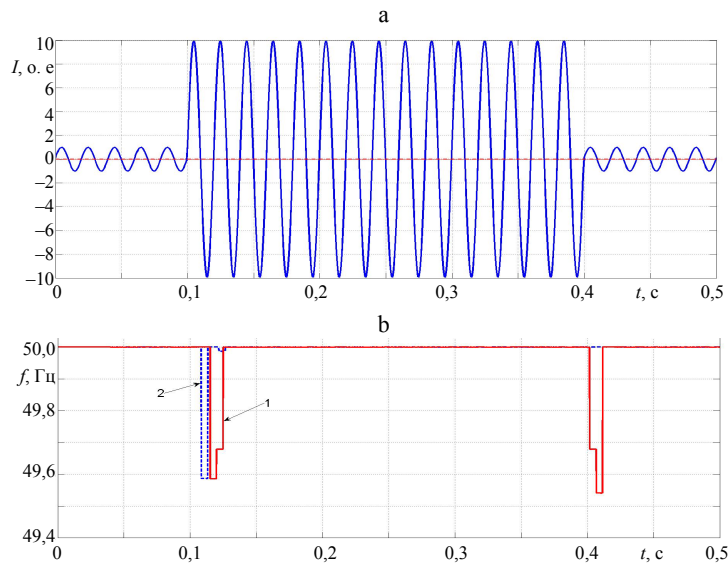


Рис. 4. а – входной синусоидальный сигнал $i(t)$; б – результаты определения частоты $f(t)$ для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) алгоритмов

Fig. 4. а – input sinusoidal signal $i(t)$; б – results of determining the frequency $f(t)$ for the first (curve 1) and second (curve 2) algorithms

Режим 2. Сигнал с аperiodической составляющей

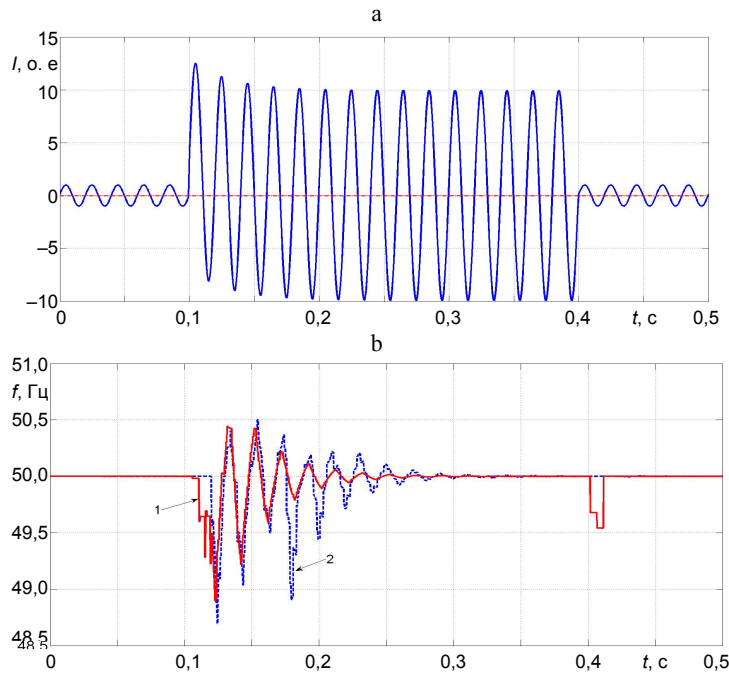


Рис. 5. а – входной сигнал с аperiodической составляющей $i(t)$; б – результаты определения частоты $f(t)$ для первого (кривая 1) и второго (кривая 2) алгоритмов

Fig. 5. а – input signal with an aperiodic component $i(t)$; б – results of determining the frequency $f(t)$ for the first (curve 1) and second (curve 2) algorithms

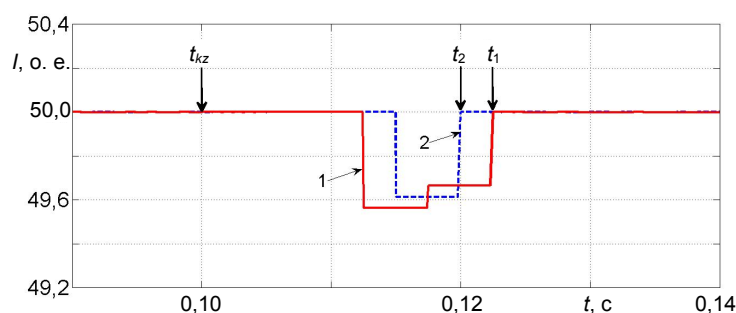


Рис. 6. Оценка быстродействия алгоритмов при угле включения $\varphi = 45^\circ$: кривая 1 – первый алгоритм; кривая 2 – второй алгоритм; t_{kz} – момент возникновения короткого замыкания; t_1 и t_2 – время определения частоты по первому и второму алгоритмам соответственно

Fig. 6. Evaluation of the algorithm performance at a switching angle of $\varphi = 45^\circ$: curve 1 – first algorithm; curve 2 – second algorithm; t_{kz} – short circuit occurrence time; t_1 and t_2 – frequency determination time according to the first and second algorithms, respectively

ВЫВОДЫ

1. Разработаны и исследованы функциональные алгоритмы оценки текущей частоты в цифровых органах релейной защиты для организации коррекции частотной составляющей погрешности определения контролируемых информационных параметров при уходе частоты от номинальной.

2. Сравнительный анализ полученных результатов, с учетом простоты реализации, позволяет считать предпочтительным для оценки текущей частоты алгоритм, основанный на использовании трех последовательных выборок каждой из ортогональных составляющих сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 594 с.
3. Фадке, А. Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / А. Г. Фадке, Джеймс С. Торп ; пер. с англ. под ред. Г. С. Нудельмана. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
4. Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем / П. Ф. Рибейро, К. А. Дуке, П. М. да Силвейра, А. С. Серкейра. М.: Техносфера, 2020. 496 с.
5. Ананичева, С. С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учеб. пособие / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин. 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 93 с.
6. Аминев, А. В. Измерения в телекоммуникационных системах: учеб. пособие. 2-е изд., стер. / А. В. Аминев, А. В. Блохин. М.: Финита, 2018. 224 с.
7. Финк, Л. М. Сигналы, помехи, ошибки... Заметки о некоторых неожиданностях, парадоксах и заблуждениях в теории связи / Л. М. Финк. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.
8. Романюк, Ф. А. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>.
9. Зайцева, И. Н. О некоторых вопросах дискретизации и определения основных параметров гармонических сигналов / И. Н. Зайцева, В. Н. Угольников // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.2>.

10. Румянцев, Ю. В. Быстродействующий метод определения амплитуды сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и управления при колебаниях частоты / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 1. С. 5–15. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15>.
 11. Романюк, Ф. А. Коррекция амплитудной и фазовой погрешностей сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты при изменении частоты / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 1. С. 5–16. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-5-16>.
 12. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
 13. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
 14. Гилат, А. MATLAB. Теория и практика / А. Гилат; пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2016. 416 с.
- Поступила 25.09.2025 Подписана в печать 27.11.2025 Опубликовано онлайн 30.01.2026

REFERENCES

1. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
2. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Phadke A. G., Thorp J. S. (2009). *Computer Relaying for Power Systems*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470749722>.
4. Ribeiro P. F., Duque C. A., Silveira P. M. da, Cerqueira A. S. (eds.) (2013) *Power Systems Signal Processing For Smart Grids*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118639283>.
5. Ananicheva S. S., Alekseev A. A., Myzin A. L. (2012) *Power Quality. Voltage and Frequency Regulation in Power Systems*. 3rd ed. Ekaterinburg, Ural Federal University. 93 (in Russian).
6. Aminev A. V., Blokhin A. V. (2018) *Measurements in Telecommunication Systems*. 2nd ed. Moscow, Finita Publ. 224 (in Russian).
7. Fink L. M. (1984) *Signals, Interference, Errors... Notes on Some Surprises, Paradoxes, and Misconceptions in Communication Theory*. 2nd ed. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 256 (in Russian).
8. Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S. (2019) Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14> (in Russian).
9. Zaitseva, I. N., & Ugol'kov, V. N. (2024). Some Problems of Discretization and Determination of Basic Parameters of Harmonic Signals. *Journal of Radio Electronics*, (7) (in Russian). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.2>.
10. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu. (2024) A Fast-Response Method for Determining the Amplitude of a Signal in Microprocessor Automation and Control Systems with Frequency Fluctuations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 5–15. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15> (in Russian).
11. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2025) Correction of Amplitude and Phase Errors of the Signal in Microprocessor Automation and Relay Protection Systems when Frequency Changes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (1), 5–16. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-5-16> (in Russian).
12. Dabney J. B. (2001) *Simulink 4 Upper Saddle River*. New Jersey.
13. Novash I. V., Romanyuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor-Based Current Protection: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, Belarusian National Technical University. 168 (in Russian).
14. Gilat A. (2015) *MATLAB: an introduction with applications*. Wiley.

Received: 25 September 2025 Accepted: 27 November 2025 Published online: 30 January 2026

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-34-49>

УДК 53(075.3)

Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов

Часть 2

**Формирование электрического тока смещения и вольт-амперной характеристики
в биполярном транзисторе**

Л. И. Гречихин¹⁾

¹⁾УО «Белорусская государственная академия связи» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Ионизация отрицательных ионов в столбообразных пустотах определяется температурой, а также внешней приложенной напряженностью электрического поля. Вследствие ионизации отрицательных ионов в зоне проводимости полупроводниковой основы образуются свободные электроны без их движения с образованием тока проводимости. Такие свободные электроны в совокупности создают внутреннее электрическое поле, которое изменяется из-за процессов ионизации и рекомбинации. Изменяющееся электрическое поле совершает колебания в инфракрасной области спектра, что является причиной возникновения электрического тока смещения. Величина тока смещения обусловлена приложенным напряжением между эмиттером и коллектором, но достаточно сложным образом. Оптимальное приложенное напряжение составляет ~6 В. При этом напряжении рассчитанный электрический ток в эмиттере достигает миллиампер, а в базе – микроампер, что соответствует экспериментальным данным. Непрерывное колебание электрического поля вследствие ионизации и рекомбинации отрицательных ионов в столбообразной пустоте приводит к разогреву транзистора инфракрасным излучением. Оптимальные условия работы транзистора реализуются, когда на базу подается дополнительное напряжение 2,5–3,0 В. Для уменьшения температуры разогрева транзистора создают массивный коллектор, который заземляется.

Ключевые слова: транзистор, ток проводимости, ток смещения, вольт-амперная характеристика

Для цитирования: Гречихин, Л. И. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Ч. 2: Формирование электрического тока смещения и вольт-амперной характеристики в биполярном транзисторе / Л. И. Гречихин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 1. С. 34–49. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-34-49>

Адрес для переписки

Гречихин Леонид Иванович
УО «Белорусская государственная
академия связи»
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 378-46-44
gretchihin@yandex.ru

Address for correspondence

Gretchikhin Leonid I.
Educational Institution “Belarusian State
Academy of Communication”
77, Uborevich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 378-46-44
gretchihin@yandex.ru

Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions

Part 2

Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium

L. I. Gretchikhin¹⁾

¹⁾Educational Institution “Belarusian State Academy of Communication”
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The ionization of negative ions in columnar voids is determined by temperature, as well as by the externally applied electric field strength. Due to the ionization of negative ions in the conduction band of the semiconductor base, free electrons are formed without their movement, forming a conduction current. These free electrons together create an internal electric field, which changes due to the processes of ionization and recombination. The changing electric field oscillates in the infrared region of the spectrum, which causes the displacement current to arise. The magnitude of the bias current is determined by the applied voltage between the emitter and collector, but in a rather complex way. The optimal applied voltage is ~6 V. At this voltage, the calculated electric current in the emitter reaches milliamperes, and in the base – microamperes, which corresponds to experimental data. Continuous oscillation of the electric field due to ionization and recombination of negative ions in the columnar void leads to heating of the transistor by infrared radiation. Optimal operating conditions for the transistor are achieved when an additional voltage of 2.5–3.0 V is applied to the base. To reduce the heating temperature of the transistor, a massive collector is created, which is grounded.

Keywords: transistor, conduction current, displacement current, volt-ampere characteristic

For citation: Gretchikhin L. I. (2026) Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions. Part 2: Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 34–49. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-34-49> (in Russian)

Введение

Электрический ток формируют свободные электрические заряды в виде электронов, заряженных отрицательным зарядом. Полагали, что в этом случае электропроводность определяется n -проводимостью, а при наличии в основном положительно заряженных «дырок» электропроводность является p -проводимостью и возникает вследствие ионизации атомов¹. Первое серьезное обоснование работы разных электронных компонент было осуществлено в рамках физики твердого тела [1]. Под действием приложенного электрического поля электроны и положительно заряженные «дырки» создают электрический ток диффузии и дрейфа [2–4].

Электрический ток, возникающий вследствие диффузии и дрейфа, противоречит определению, которое было дано Максвеллом на основании записанных им уравнений, описывающих взаимодействие электрических и магнитных полей. Из уравнений Максвелла следует, что в природе существуют только два типа электрических токов – ток проводимости и ток смещения [5, 6]. Если вводить новые виды электрических токов,

¹ Чтобы ионизовать атом с энергией ионизации 10 эВ и радиусом 1 Å, необходимо приложить внешнее электрическое поле $E = 10^{11}$ В/м. Создать такое внешнее поле просто невозможно. Тогда о каких положительно заряженных «дырках» идет речь?

то надо разрабатывать под эти токи и новую электродинамику с доказательством, что теория Максвелла противоречит полученным экспериментальным данным. Однако справедливость теории Максвелла экспериментально доказана во всех случаях, в том числе и для полупроводников с примесями и без примесей [7].

На основании уравнений, представленных Максвеллом, электрический ток проводимости определяется движением свободных электрических зарядов преимущественно свободных электронов. Тогда

$$I_p = en_e v_e S, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; n_e – концентрация свободных электронов; v_e – подвижность электронов; S – площадь сечения, через которую движутся свободные электроны; в электронике она составляет не более 100×100 мкм² [2, 3].

Электрический ток смещения является потоком вектора скорости изменения электрического поля через некоторую поверхность, т. е. [5]

$$J_D = \int_0^S \frac{\partial D}{\partial t} dS, \quad (2)$$

где D – вектор электрического смещения, который создается свободными электрическими зарядами.

Перенос энергии токами смещения определяется вектором Умова – Пойнтинга, и только в этом случае выполняется закон Ома [5]. Для токов проводимости закон Ома не выполняется. По электрическим проводам и оптоволокну протекает только ток смещения и распространяется по поверхности для проводников и по центральному диэлектрику для оптоволокну. Поверхностный слой каждого твердого тела является диэлектриком, по которому распространяются токи смещения в виде электромагнитных волн. Такое определение току смещения было дано Николой Тесла независимо от Максвелла.

Для транзисторов разработаны два типа конструкций – биполярные и полевые. По ранее сформированным представлениям в обоих типах транзисторов используются два p – n перехода. Формируются оба перехода путем легирования основного полупроводника разными примесями. У катода и анода вводят один тип примеси, а между ними другой тип, т. е. возникают два варианта проводимостей: n – p – n или p – n – p .

В биполярном транзисторе внешние проводники обозначаются коллектор – эмиттер, а внутренняя область – база. В полевом транзисторе это исток – сток, а внутренняя – затвор. В электрических схемах оба типа транзисторов подключаются к источнику тока в трех вариантах: 1 – с общим коллектором (исток); 2 – с общей базой (затвором); 3 – с общим эмиттером (сток).

Наиболее часто применяется третий вариант включения, показанный на рис. 1. Для такого варианта включения биполярного транзистора экспериментально получена вольт-амперная характеристика, которая приведена на рис. 2 без указания того, какие примеси и каким методом вводились в кремниевую основу.

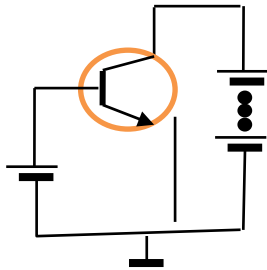


Рис. 1. Схема включения транзистора с общим эмиттером

Fig. 1. Common emitter transistor circuit diagram

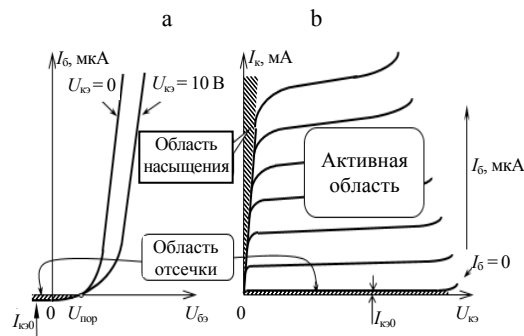


Рис. 2. Семейства входных (а) и выходных (б) характеристик биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером

Fig. 2. Families of input (a) and output (b) characteristics of a bipolar transistor in a common-emitter circuit

Полученная вольт-амперная характеристика кремниевого транзистора по виду соответствует вольт-амперной характеристике кремниевого диода при его обратном включении [7]. Отличие только в тангенсе угла наклона и в значениях приложенного напряжения между эмиттером и коллектором. Угол наклона определяется соотношением, какой механизм ионизации является определяющим вследствие воздействия температуры или воздействия внешнего приложенного электрического поля.

В настоящее время в биполярном транзисторе базу изолировали и получили вместо базы затвор, как у полевого транзистора. Следовательно, оба типа транзисторов работают на одном и том же физическом принципе. Их отличие состоит в разной конструкции исполнения. Обусловлено это тем, что возникновение электрических токов происходит не вследствие ионизации атомов, а вследствие ионизации отрицательных ионов [8–10], которые образуются в твердом теле на поверхности кристалла. Учитывая ионизацию отрицательных ионов, а также процесс формирования тока проводимости и тока смещения, по Максвеллу, рассмотрим подробно динамику работы транзистора с общим эмиттером (стоком). Для обоснования общей теории работы транзистора другие типы включения можно не рассматривать.

Чтобы выяснить динамику работы транзистора при наличии отрицательных ионов и их ионизации, необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть процесс ионизации отрицательных ионов под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля;
- выяснить, где и в каких условиях возникает ток проводимости и ток смещения;
- произвести расчет вольт-амперных характеристик биполярного транзистора с общим эмиттером в сравнении с экспериментальными данными.

Основная часть

Ионизация отрицательных ионов в столбообразных пустотах.

Каждый электронный прибор обладает своей характерной вольт-амперной характеристикой. Применительно к диодам и транзисторам вольт-ампер-

ную характеристику представляли на p – n переходе с использованием экспоненциальной зависимости от приложенного напряжения [2–4], что противоречит экспериментальным данным.

Для перевода связанного электрона в отрицательном ионе на поверхности кристалла полупроводниковой основы в свободный необходимо преодолеть энергию связи отрицательного иона с поверхностью кристалла в столбообразной пустоте

$$\Delta E = \Delta E_i - E_A, \quad (3)$$

где ΔE_i – смещение границы ионизации атомов полупроводниковой основы, которая определяет границу начала зоны проводимости полупроводникового кристалла; E_A – энергия сродства атомов примеси, которые находятся в зоне проводимости.

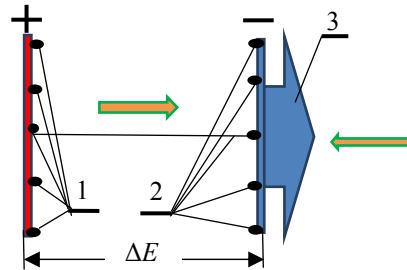


Рис. 3. Формирование электрического поля на поверхности кристалла полупроводниковой основы примесями: 1 – связанные отрицательные ионы; 2 – свободные отрицательные ионы; 3 – ток смещения

Fig. 3. Formation of an electric field on the surface of a semiconductor crystal by impurities: 1 – bound negative ions; 2 – free negative ions; 3 – displacement current

Переход (3) для отрицательного иона не запрещен, и он в зоне проводимости вследствие ионизации переходит из связанного состояния в свободное состояние. Образующийся положительный заряд в начале зоны проводимости своим полем компенсирует поле², создаваемое отрицательными ионами примеси, что показано на рис. 3.

Возникновение свободных электронов при ионизации отрицательных ионов в зоне проводимости обусловлено воздействием температуры и внешнего электрического поля. Свободные электроны находятся выше границы ионизации атомов кристалла полупроводниковой основы. Аналогичное воздействие определено в [7, 11] для атомов примеси в диодах, когда включает-

ся обратное внешнее электрическое поле. Применительно к транзисторам вероятность перехода электронов отрицательных ионов примеси на границе полупроводникового кристалла из связанного состояния в свободное под действием внешнего электрического поля при заданной температуре определяется по формуле [11]³

$$\vartheta_1 = \left(1 - \frac{(e\Delta\phi)^2}{\Delta E^2} \right) \exp \left[-\frac{\Delta E}{k_b T_e} \left(1 - \frac{(e\Delta\phi)^2}{\Delta E^2} \right) \right]. \quad (4)$$

² Это очень важное явление, с которым столкнулись впервые. К чему это новое явление может привести, кроме работы транзисторов, сейчас трудно предвидеть.

³ В данном случае речь идет о чисто автоэлектронной эмиссии, без учета изменения температуры.

На пространстве примесных атомов в виде отрицательных ионов наложенное внешнее электрическое поле наводит разность потенциалов величиной

$$\Delta\varphi = E_z 2r_a. \quad (5)$$

Напряженность электрического поля E_z в равенстве (5) создается величиной напряжения, приложенного между эмиттером и базой. Относительная диэлектрическая проницаемость контакта молекул алюминий – кремний и алюминий – германий при взаимодействии трехатомных молекул вокруг столбообразной пустоты равна [12]

$$\varepsilon_r = \frac{3^2 n_p P_{Si} P_{Al}}{3\varepsilon_0 k_b T}. \quad (6)$$

Здесь рассматривается взаимодействие двух разных трехатомных молекул полупроводниковой основы и алюминия; концентрация дипольных электрических моментов n_p трехатомных молекул кремния (или германия) и алюминия вокруг столбообразных пустот; P_{Si} и P_{Al} – электрические диполи атомов кремния и алюминия (или германия и алюминия); ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума по Зоммерфельду; k_b – постоянная Больцмана; T – температура транзистора.

Значение диэлектрической проницаемости для контакта алюминий – кремний и алюминий – германий составит $\varepsilon_r = 12,44$ и $\varepsilon_r = 8,29$ соответственно. Небольшое отличие диэлектрических проницаемостей от значений, полученных для диодов [7], обусловлено разным размещением электрических диполей в первом и во втором случаях.

Для транзисторов падение напряжения на атомах примеси внутри столбообразной пустоты составит

$$\Delta\varphi = U \frac{r_a}{\varepsilon_r (r_{Al} + r_{Si(Ge)})}. \quad (7)$$

Если разность потенциалов (7) умножить на заряд электрона, то получим энергию, которую отрицательный ион примеси приобретает от внешнего приложенного электрического поля. Если эта энергия будет равна или больше энергии сродства отрицательного иона примеси, то произойдет ионизация отрицательного иона и электрон перейдет из связанного состояния в свободное, т. е. выполняется условие

$$e\Delta\varphi \geq E_A. \quad (8)$$

Условие (8) германий – мышьяк и кремний – мышьяк должно выполняться соответственно при прямом приложенном напряжении 3,50 и 3,36 В, а для контактов германий – индий и кремний – индий приложенное напря-

жение составит 0,630 и 0,637 В. При подаче таких напряжений внешнее электрическое поле со временем не изменяется и электрический ток во внешней электрической цепи будет обладать постоянным значением. В транзисторе таких контактов два. Поэтому максимальное напряжение, подаваемое на транзистор, составляет: ~8,26 В – с германиевой основой, ~7,99 В – с кремниевой основой.

Кроме этого, необходимо обеспечить еще очень важное для транзисторов условие. Электрические токи, формируемые отрицательными ионами мышьяка и индия, существенно отличаются. Чтобы это устранить, необходимо обеспечить достаточную разность во времени в процессе легирования мышьяком и индием. Время легирования мышьяком должно быть значительно меньше времени легирования индием. Эти времена экспериментально определены, но оптимальное соотношение остается неясным⁴.

Образование отрицательных ионов в зоне проводимости полупроводниковой основы приводит к возникновению переменного электрического поля внутри столбообразной пустоты, а при наличии такого поля возникает электрический ток смещения вдоль поверхности полупроводниковой основы. Следовательно, в транзисторах возникает только электрический ток смещения⁵ и распространяется этот ток между поверхностями кристаллов алюминия и полупроводниковой основы. Поэтому транзисторы изготавливают так, чтобы контакты алюминия на эмиттере, базе и коллекторе (источка, затвора и стока) располагались на одной поверхности над полупроводниковой основой с примесями.

Возникновение электрического тока смещения в биполярном транзисторе. Общая конструктивная особенность транзисторов при диффузионном легировании примесей показана на рис. 4. Мономолекулярный слой, легированный мышьяком, присутствует во всех столбообразных пустотах под коллектором, базой и эмиттером, а дополнительно индий – только под коллектором и эмиттером. Когда наносится изготовленная пластина полупроводника на поверхность алюминиевых электродов, молекулярные поверхности сцепляются своими молекулами так, что образуется общая столбообразная пустота.

Молекулы в столбообразных пустотах на кристалле полупроводника распадаются на атомы, которые, взаимодействуя с кристаллом полупроводника, превращаются в отрицательные ионы. Энергетически примеси отрицательных ионов мышьяка и индия находятся на границе смещения энергии ионизации атомов полупроводниковой основы, за которой образуется зона проводимости кристалла полупроводника. На основании энергетической схемы расположения примесей в столбообразной пустоте [13, рис. 9] смещение границы ионизации атомов кремния и германия

⁴ В результате технология производства чипов для микросхем реализуется на уровне интуиции.

⁵ Ранее полагали, что свободные электроны в зоне проводимости создают ток проводимости вследствие диффузии. Такой электрический ток в принципе невозможен, так как электроны внутри кристалла двигаться не в состоянии.

составляет ширину зоны проводимости соответственно для мышьяка и германия 1,158 и 0,829 эВ.

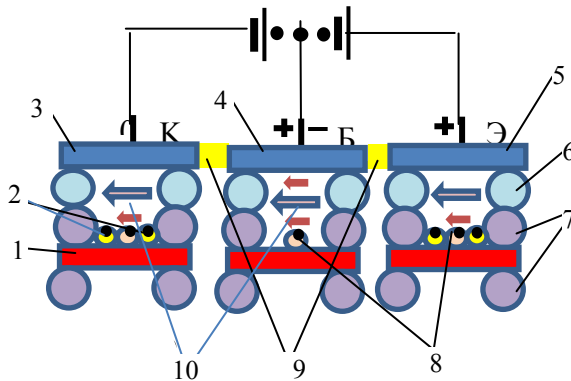


Рис. 4. Общий вид столбообразных пустот на разных электродах полупроводникового транзистора: 1 – кристалл полупроводника; 2 – атомы индия; 3 – кристалл коллектора; 4 – кристалл базы; 5 – кристалл эмиттера (алюминий); 6 – молекулы на кристалле электродов из алюминия; 7 – молекулы на поверхности кристалла полупроводниковой основы; 8 – атомы мышьяка в столбообразных пустотах полупроводниковой основы; 9 – прослойка из диэлектрика Al_2O_3 ; 10 – электрический ток смещения

Fig. 4. General view of columnar voids on different electrodes of a semiconductor transistor: 1 – semiconductor crystal; 2 – indium atoms; 3 – collector crystal; 4 – base crystal; 5 – emitter crystal (aluminum); 6 – molecules on a crystal of aluminum electrodes; 7 – molecules on the surface of a semiconductor crystal; 8 – arsenic atoms in columnar voids of the semiconductor base; 9 – прослойка из диэлектрика Al_2O_3 dielectric layer; 10 – electric displacement current

Чтобы получить свободные электроны в зоне проводимости при ионизации отрицательных ионов мышьяка на основании энергетической схемы расположения примесей $\Delta E = 1,158 - 0,80 = 0,358$ в столбообразной пустоте, необходимо преодолевать энергию 0,358 эВ, а при ионизации индия – энергию 0,858 эВ. Аналогично для германия эти величины составляют 0,029 и 0,529 эВ. Отсюда следует, что для кремниевого транзистора мышьяк в эмиттерной зоне создает электромагнитное излучение частотой $\nu_a = 8,656 \cdot 10^{13}$ Гц, а индий $\nu_i = 1,279 \cdot 10^{14}$ Гц. В германиевом транзисторе соответственно $\nu_a = 7,012 \cdot 10^{12}$ Гц и $\nu_i = 8,656 \cdot 10^{13}$ Гц. В обоих случаях это диапазон инфракрасного излучения. Наибольшая мощность излучения возникает в эмиттерной зоне. Возникший поток мощности инфракрасного излучения в соответствии с рис. 2 может распространяться только в направлении от эмиттера в базу между полупроводником и алюминиевыми электродами и преимущественно вдоль алюминиевых электродов по глиноземному покрытию. Глинозем используется в качестве диэлектрика между электродами и поэтому не является препятствием для распространения электромагнитного излучения в зонах контакта эмиттер – база и база – коллектор. Когда на базу подается напряжение, работает не полный размер базы, а только ее часть. Насыщенная часть в контакте эмиттер – база и обедненная часть в контакте база – коллектор исключаются из работы базы. В этом заключается эффект Эрли.

Полное возбуждение примесей мышьяка на основе кремния произойдет при температуре ~ 4152 К, а на основе германия ~ 336 К. Следовательно, транзисторы на германиевой основе должны работать при температурах не выше 63°C . В результате при длительной работе происходит разогрев электрической схемы и германиевый транзистор на изменение температуры не реагирует. Эффективность работы германиевого транзистора несколько ухудшается. Поэтому германиевый транзистор применяется в редких случаях и изготавливается в ограниченных количествах.

На основании экспериментальных данных полагают, что в зоне эмиттера концентрация акцепторных примесей достигает $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а в базе концентрация донорной примеси составляет $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. В рассматриваемом варианте с учетом старой терминологии акцепторная примесь – это индий и донорная примесь – мышьяк. На площади $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ содержится $1,342 \cdot 10^9$ столбообразных пустот. Мышьяк заполняет только 10^5 пустот. Тогда доля пустот, которые заполнены индием, по сравнению с долей пустот, которые заполнены мышьяком, составит примерно $\gamma = 1,342 \cdot 10^4$. В отсутствие дополнительного сигнала на базе электрический ток в базе должен соответствовать электрическому току в эмиттере.

Следует учитывать не только то, как соотносятся площади заполненных столбообразных пустот с разными примесями, но и их мощности, которые зависят от времени жизни возбужденного состояния. Отношение этих времен жизни возбужденных состояний равно отношению их энергий возбуждения. Из энергетической схемы расположения примесей в столбообразной пустоте следует, что такое отношение времен жизни индия и мышьяка составляет для кремниевого транзистора $0,868/0,358$. Следовательно, для кремниевого транзистора получаем эффективное значение $\gamma \approx 3,254 \cdot 10^4$.

Убыль отрицательных ионов в зоне проводимости введенных примесей на поверхность германия или кремния непрерывно восполняется путем спонтанного перехода электронов отрицательных ионов в исходное состояние, т. е. на границу перехода между распределением их по энергиям в кристалле германия или кремния. Количество отрицательных ионов на уровне смещенной границы ионизации атомов полупроводниковой основы будет находиться в связанном состоянии постоянно.

Некоторая доля отрицательных ионов примеси под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля будет пребывать на уровне энергии сродства, который находится в зоне проводимости полупроводниковой основы. В этом случае ионизация отрицательных ионов происходит самопроизвольно, что приведет к образованию свободных электронов в зоне проводимости. Свободные электроны, накапливаясь на уровне энергии сродства, будут самопроизвольно возвращаться обратно. При этом возникают электромагнитные волны, которые распространяются вдоль поверхности кристалла полупроводниковой основы и алюминия, создавая ток смещения. Ранее полагали, что не отрицательные ионы, а свя-

занные электроны являются «тяжелыми», а свободные электроны являются «легкими» и они отличаются по массе⁶ [2].

Напряжение на транзистор подается только одного направления от эмиттера к коллектору. Для общей площади полупроводникового кристалла $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ упростим конструкцию транзистора и представим в виде, приведенном на рис. 5. Экспериментально добиваются, чтобы ширина базы составляла $l_2 \approx 25 \text{ мкм}$.

Каждая электрически заряженная малая по ширине полоска создает неоднородное электрическое поле. Чтобы создать однородное поле, необходимо ширину полоски доводить до значения $\sim 25 \text{ мкм}$ и более⁷. Поэтому минимальный размер эмиттера следует принять $S_1 = 25 \times 25 \text{ мкм}^2$. Ширину изолирующих полос глинозема Al_2O_3 между алюминиевыми электродами достаточно реализовать $\sim 2 \text{ мкм}$. Тогда размер базы составит $S_2 \sim 2075 \text{ мкм}^2$, а размер коллектора $S_3 \sim 7300 \text{ мкм}^2$.

Напряжение подается от эмиттера к коллектору. На металле подаваемое напряжение создает эквипотенциальную поверхность. Поглощение электромагнитного излучения возникает только на глиноземных диэлектрических вставках. Общая длина глиноземных вставок в рассматриваемой конструкции (рис. 5) составляет 187 мкм , а обрамление эмиттера обладает длиной 79 мкм . Поэтому падение общего подаваемого напряжения между эмиттером и базой составит: $\Delta U_1 = \frac{79}{187} U \approx 0,42U$, а между базой и кол-

лектором $\Delta U_2 \approx 0,58U$. Учитывая условие (1), оптимальное напряжение между коллектором и эмиттером не должно превышать $\sim 6 \text{ В}$, т. е. на коллекторе напряжение равно нулю, а на базе при внешнем напряжении $\sim 6 \text{ В}$, это составит $3,48 \text{ В}$. Соответственно в зоне эмиттера падение напряжения составит $2,52 \text{ В}$, что менее предельного ($3,26 \text{ В}$). В результате условие (6) не нарушается.

Уровень энергии сродства отрицательного иона мышьяка и индия на поверхности германия или кремния находится в зоне проводимости этих кристаллов и обладает энергией связи, равной смещению потенциала ионизации атомов кристалла полупроводника. Для атомов кремния это

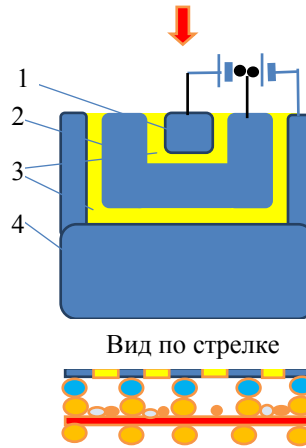


Рис. 5. Общий вид биполярного транзистора сверху: 1 – эмиттер; 2 – база; 3 – глиноземная прослойка; 4 – коллектор

Fig. 5. General view of a bipolar transistor from above: 1 – emitter; 2 – base; 3 – alumina layer; 4 – collector

⁶ Электрон является фундаментальной частицей, и поэтому разных электронов в природе не существует.

⁷ Удивительно, что теоретически заряженная полоска действительно создает однородное поле при ширине 25 мкм и более.

отрицательный уровень энергии 1,158 эВ, а для атомов германия 0,829 эВ. Такой энергией отрицательные ионы связаны с атомами кристалла полупроводника на его поверхности внутри столбообразной пустоты. Атомы примеси мышьяка и индия обладают энергией сродства соответственно 0,8 и 0,3 эВ [14]. Чтобы эти отрицательные ионы перевести в зону проводимости, необходимо затратить работу. Значения этих работ приведены на рис. 9 в [13].

Отрицательные ионы атомов примеси находятся на границе зоны проводимости кристалла кремния или германия, а их возбуждение с переводом в зону проводимости приводит к образованию свободных электронов. Свободные электроны возникают внутри зоны проводимости. Совершать движение внутри кристалла они не могут, но внутри столбообразной пустоты формируют внешнее электрическое поле. Такое поле изменяется во времени вследствие спонтанного перехода на основной уровень энергии зоны проводимости, превращаясь в связанные электроны. Опытами Эйхенвальда установлено, что вокруг изменяющегося во времени электрического поля возникает изменяющееся магнитное поле, т. е. формируется электромагнитная волна.

Электромагнитные волны в столбообразной пустоте переносят энергию вектором Умова – Пойнтинга в виде плоской волны. В этом случае среднее значение потока энергии электромагнитной волны в отдельной столбообразной пустоте равно [6]

$$P = \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\mu_r \mu_0}} \frac{(E_\tau^\tau)^2}{2}, \text{ Вт/м}^2. \quad (11)$$

Здесь напряженность электрического поля E_τ^τ создается не внешним приложенным полем, а полем возбужденных свободных электронов вследствие самопроизвольной ионизации отрицательных ионов в зоне проводимости, формирование которого показано на рис. 5.

Поверхностная концентрация отрицательных ионов в зоне проводимости формирует заряженную плоскость. Процессы возбуждения и спонтанного перехода создают непрерывное колебание наведенной напряженности электрического поля. В конечном итоге создается ток смещения. Величину амплитуды наведенной напряженности электрического поля внутри столбообразной пустоты представим в общем виде следующим образом:

$$E_\tau^\tau = \frac{eN_a \vartheta_1}{2\pi R_{\text{Si(Ge)}}^2 \epsilon_r \epsilon_0}. \quad (12)$$

Здесь eN_a – полное количество атомов примеси в столбообразной пустоте в виде отрицательных ионов; для мышьяка $N_a = 3$, а для индия $N_a = 2$; ϑ_1 – вероятность возбуждения отрицательных ионов атомов примеси на границе зоны проводимости, которая определяется формулой (2), преодо-

левая энергию связи с полупроводниковым кристаллом; $R_{\text{Si(Ge)}}$ – эффективный радиус столбообразной пустоты на поверхности кристалла кремния, который на основании рис. 3 равен $1,54 \cdot 10^{-9}$ м. Для столбообразной пустоты $\varepsilon_r = 1$. В уравнении (4) температура T_e является температурой электронного газа, которая на разных границах перехода может несколько отличаться от температуры корпуса транзистора [20]. В ряде случаев это следует учитывать.

Используя теорию размерностей на основании формулы (11) с учетом закона полного тока результирующий эффективный электрический ток смещения следует определить в виде

$$I_{\text{см}} = [(P_1 + P_2)S_1 \cdot 0,42 + P_3S_2 \cdot 0,58 + (P_4 + P_5)S_3]/U. \quad (13)$$

Здесь P_1 и P_2 – поток вектора Умова – Пойнтинга для мышьяка и индия в зоне эмиттера; P_3 – поток вектора Умова – Пойнтинга в базе; P_4 и P_5 – температурный поток вектора Умова – Пойнтинга для мышьяка и индия в зоне коллектора с учетом рассеяния и поглощения на глиноземе, применяемого на границах перехода между зонами; U – разность потенциалов, которая приложена между эмиттером и коллектором; S_1 , S_3 – площадь соответственно эмиттера и коллектора, где происходит ионизация отрицательных ионов атомов примеси мышьяка и индия; S_2 – то же базы, в которой происходит ионизация только атомов мышьяка. Формула (13) является вольт-амперной характеристикой как германиевого, так и кремниевого транзисторов.

Расчет токов смещения по (13) достаточно сложный, и поэтому был разработан алгоритм расчета и произведены соответствующие вычисления. В результате ток смещения под эмиттером определяется переводом отрицательных ионов мышьяка и индия под действием температуры и приложенного электрического поля. Ток смещения в базе определяется переводом в зону проводимости только отрицательных ионов мышьяка под действием температуры и приложенного электрического поля. При этом следует учитывать, что электрический ток смещения в базе, возникающий вследствие ионизации только мышьяка, не должен существенно отличаться от возникающего тока смещения в эмиттерной зоне. Чтобы как-то это обеспечить, электрические токи, возникающие в разных зонах транзистора, поверхности электродов увеличивают от эмиттера к коллектору с учетом падения напряжения на границах перехода от одной зоны к другой. После определения токов смещения в транзисторе рассмотрим, как формируются вольт-амперные характеристики в биполярном транзисторе и определим оптимальные условия функционирования этого вида техники с общим эмиттером.

Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора с общим эмиттером. Так как энергия сродства вводимых примесей в полупроводниковую основу располагается в зоне проводимости и при этом возникают токи смещения непосредственно в столбообразной пустоте, на гра-

нице перехода полупроводник – металл (алюминий) электромагнитная волна тока смещения изменяется вследствие ослабления скорости распространения и наличия диэлектрической прослойки в контакте между электродами, как показано на рис. 3.

Для кремниевого транзистора выполнен расчет токов смещения в зависимости от приложенного напряжения между эмиттером и коллектором. Результаты приведены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что при напряжении 7 и 8 В между эмиттером и коллектором в базе возникает электрический ток большой величины. При таких токах будет происходить мощный разогрев транзистора инфракрасным излучением внутри зоны проводимости и он может прекратить свою работу.

Таблица 1

Значения электрических токов в зависимости от приложенного напряжения в биполярном транзисторе между эмиттером и коллектором (BAX)
Values of electric currents depending on the applied voltage in a bipolar transistor between the emitter and collector (VAC – Volt-Ampere Characteristic)

Падение напряжения эмиттер – коллектор, В	8	7	6	5	4	3	2	1
Падение напряжения на эмиттере, В	3,36	2,94	2,52	2,10	1,58	1,26	0,84	0,42
Падение напряжения на базе, В	4,64	4,06	3,48	2,90	2,32	1,74	1,16	0,58
Электрический ток в эмиттере при ионизации индия, А	$3,79 \cdot 10^{-2}$	$7,98 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$6,18 \cdot 10^{-6}$	$2,44 \cdot 10^{-6}$
Электрический ток в эмиттере при ионизации мышьяка, А	$8,45 \cdot 10^{-6}$	$4,41 \cdot 10^{-6}$	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,44 \cdot 10^{-6}$	$0,308 \cdot 10^{-6}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$
Электрический ток в базе, А	7,80	0,613	$3,39 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$5,81 \cdot 10^{-6}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$0,90 \cdot 10^{-6}$

Наиболее оптимальная работа биполярного транзистора реализуется при подаче напряжения между коллектором и эмиттером 6 В. При таком напряжении электрический ток смещения в основном формируется в зоне эмиттера и составляет миллиамперы, а в зоне базы электрический ток не превышает микроампер. Полученные теоретически значения электрических токов соответствуют экспериментальным данным.

В электронике транзисторы применяются в основном для усиления электрических сигналов. Для этого на базу дополнительно подают напряжение от 2,5 до 3,0 В [2, 3]. В оптимальном режиме работы биполярного транзистора между базой и коллектором подается напряжение ~6 В. При этом напряжении на базе падение напряжения составляет ~3,48 В. Если на это напряжение накладывать дополнительно 2,5–3,0 В, то электрический ток в базе будет возрастать. Но и температура должна также возрастать. Конкретные расчеты электрического тока в зависимости от приложенного напряжения на базу и увеличения температуры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Электрический ток в базе, А, в зависимости от приложенного внешнего напряжения и увеличения температуры транзистора относительно 20 °С
Electric current in the base in amperes depends on the applied external voltage and the increase in transistor temperature relative to 20 °С

Изменение температуры относительно 20 °С	Дополнительное напряжение, подаваемое на базу, В					
	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	$3,39 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$3,91 \cdot 10^{-4}$	$9,04 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$4,95 \cdot 10^{-3}$
5	$4,89 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$4,89 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$2,81 \cdot 10^{-3}$	$6,51 \cdot 10^{-3}$

Получается, что увеличение напряжения в базе на 2,5–3,0 В приводит к возрастанию тока в базе и по порядку величины совпадает с током в эмиттере. В этих условиях коэффициент усиления биполярного транзистора на кремниевой основе будет максимально возможным. Экспериментальные данные теория подтверждает. Удивительно!

Важно также выяснить, как теория поясняет полученные вольт-амперные характеристики опытным путем. Воздействие внешнего электрического поля внутрь зоны проводимости кристалла полупроводниковой основы не проникает, поэтому не оказывает влияния на ионизацию отрицательных ионов. Свободные электроны внутри зоны проводимости возникают из-за воздействия только температуры. В зоне проводимости вследствие ионизации отрицательных ионов с повышением температуры экспоненциально возрастает концентрация свободных электронов. При заданной температуре возникает определенная величина тока смещения. На рис. 2 показана начальная область на оси изменения подаваемого напряжения от внешнего источника.

По мере возрастания подаваемого напряжения на транзистор тангенс угла наклона к оси ординат электрического тока смещения возрастает с увеличением температуры. Это обусловлено тем, что с повышением температуры возрастает общая мощность инфракрасного излучения и происходит заметный разогрев всей конструкции транзистора. Чтобы этот процесс уменьшить, максимально увеличивают массу коллектора.

С ростом температуры и при определенном приложенном напряжении включается термоавтоэлектронная эмиссия. Когда преодолевается работа выхода электронов из кристалла полупроводниковой основы, несколько возрастает ток смещения. При полном преодолении работы выхода из кристалла полупроводниковой основы в соответствии с вероятностью преодоления работы выхода, определяемой формулой (7), электрический ток равен нулю. Это экспериментально обнаружено (рис. 2).

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных теоретических исследований биполярного транзистора, в котором в качестве примесей использованы мышьяк

и индий, установлено, что его вольт-амперная характеристика определяется токами смещения.

2. Установлены условия, при которых биполярный транзистор обладает максимальным коэффициентом усиления.

3. Определены оптимальные условия функционирования биполярного транзистора с примесями мышьяка и индия: напряжение питания коллектор – эмиттер 6 В, тогда на эмиттере падение напряжения составляет 2,52 В, а на базе 3,48 В. Дополнительное напряжение на базу не должно превышать 3 В. Экспериментально эти значения полностью подтверждены.

4. Проведенные исследования позволили выяснить характер поведения вольт-амперной характеристики биполярного транзистора при разных напряжениях питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гречихин, Л. И. Основы физики твердого тела, атомного ядра и плазмы / Л. И. Гречихин, Я. В. Ленец. Минск: МВИЗРУ, 1972. 271 с.
2. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
3. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника: учеб. для вузов / Ю. С. Забродин. М.: Альянс. 2013. 496 с.
4. Гладков, Л. Л. Физические основы электроники: учеб. пособие / Л. Л. Гладков, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 227 с.
5. Гречихин, Л. И. Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика / Л. И. Гречихин. Минск: Право и экономика, 2008. 302 с.
6. Гречихин, Л. И. Основы радиосвязи / Л. И. Гречихин. Минск: Национальная библиотека Беларуси, 2016. 377 с.
7. Гречихин, Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 2: Вольт-амперные характеристики диодов металл – полупроводник / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 4. С. 291–310. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310>.
8. Гречихин Л. И. Формирование p - и n -проводимости отрицательными ионами / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. 2022. № 6. С. 8–16.
9. Gretchikhin, L. I. Formation of p - n -Conductivity in Semiconductors / L. I. Gretchikhin // Journal Military Technical Courier Scientific Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. 2018. Vol. 66, № 3. P. 304–321.
10. Гречихин, Л. И. Формирование p -, n -проводимости и p - n перехода / Л. И. Гречихин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14, № 5. С. 231–238.
11. Gretchikhin, L. I. Formation of Negative Ions on the Surface of a Solid Body and Their Influence on the Thermoelectronic and Autoelectronic Emission of Free Electrons / L. I. Gretchikhin // American Journal of Scientific Research. 2019. Vol. 5, No 3. P. 47–55. <https://doi.org/10.11648/j.ajasr.20190503.11>.
12. Гречихин, Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 1: Формирование токов проводимости и токов смещения на p - n переходе / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 3. С. 209–229. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229>.
13. Гречихин, Л. И. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Ч. 1: Строение полупроводникового твердого тела, легированного мышьяком и индием / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 6. С. 491–503. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503>.

Поступила 08.08.2025 Подписана в печать 10.10.2025 Опубликована онлайн 30.01.2026

REFERENCES

1. Gretchikhin L. I., Lenets Ya. V. (1972) *Fundamentals of Solid State, Nuclear, and Plasma Physics*. Minsk, Minsk Higher Engineering Anti-Aircraft Missile School. 271 (in Russian).
2. Zherebtsov I. P. (1990) *Basics of Electronics*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
3. Zabrodin Yu. S. (2013) *Industrial Electronics*. Moscow, Alyans Publ. 496 (in Russian).
4. Gladkov L. L., Gulakov I. R., Zenevich A. O. (2017) *Physical Principles of Electronics: Training Manual*. Minsk, Publishing House of Belarusian State Academy of Telecommunications. 227 (in Russian).
5. Gretchikhin L. I. (2008) *Physics. Electricity and Magnetism. Modern Electrodynamics*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 302 (in Russian).
6. Gretchikhin L. I. (2016) *Basics of Radio Communications*. Minsk, Publishing House of National Library of Belarus. 377 (in Russian).
7. Gretchikhin L. I. (2025). Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 2. Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Diodes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (4), 291–310. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310> (in Russian).
8. Gretchikhin L. I. (2022) Formation of p- and n-conductivity by negative ions. *The Aviation Herald*, 2022, (6), 8–16 (in Russian).
9. Gretchikhin L. I. (2018) Formation of p-, n-Conductivity in Semiconductors. *Vojnotehnički glasnik = Military Technical Courier*, 66 (3), 304–321.
10. Gretchikhin L. I. (2018) The Formation of p-, n-Conductivity and p-n-Junction. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 14 (5), 231–238. (in Russian).
11. Gretchikhin L. I. (2019) Formation of Negative Ions on the Surface of a Solid Body and Their Influence on the Thermoelectronic and Autoelectronic Emission of Free Electrons. *American Journal of Applied Scientific Research*, 5 (3), 47–55. <https://doi.org/10.11648/j.ajasr.20190503.11>.
12. Gretchikhin L. I. (2025) Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 1: Formation of Conduction Currents and Displacement Currents at the p-n Junction. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (3), 209–229. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229> (in Russian).
13. Gretchikhin L. I. (2025) Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions. Part 1. Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (6), 491–503. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503> (in Russian).

Received: 8 August 2025

Accepted: 10 October 2025

Published online: 30 January 2026

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-50-63>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер

Часть 2

**Т. В. Рыжова¹⁾, Д. Д. Тумаркина²⁾, Д. Н. Бухаров²⁾, В. Д. Самышкин²⁾,
А. Ф. Лелекова²⁾, М. М. Аракелян³⁾, А. О. Кучерик²⁾, С. М. Аракелян²⁾**

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

²⁾Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Российская Федерация),

³⁾Ереванский государственный университет (Ереван, Республика Армения)

Реферат. Во второй части статьи проведено исследование и моделирование электрофизических характеристик деталей разного назначения с определенной лазерно-индуцированной конфигурацией микро- и наноструктурных особенностей на поверхности изделия. Актуальность данного рассмотрения связана с тем, что при функционировании любой энергетической установки неотъемлемой ее частью являются значения ее электрофизических характеристик. Проведенные исследования позволяют управлять ими как в подводящей платформе собственно электропитания от соответствующих генераторов для установки, так и в отводящей от нее энергии для обеспечения работы соответствующих блоков, электропитание которых осуществляется энергоустановками разного класса при их функционировании в требуемых режимах, включая и экстремальные динамические режимы эксплуатации. В исследовании речь идет конкретно о демонстрационных схемах с прототипами систем с использованием микросвитков 1D-структур диоксида титана в металлоуглеродных соединениях (углерод – золото) в условиях цепочного C–Au легирования. При этом была реализована трехэтапная схема с использованием лазерной абляции из титановой мишени с синтезом тонкой пористой пленки диоксида титана и ее осаждением на демонстрационную подложку из кварцевого стекла. Далее производился ввод линейных цепочек углерода, стабилизированных наночастицами золота по краям линейных цепочек, в матрицу пористой пленки диоксида титана струйным распылением и реализовывалось формирование массива микросвитков, получаемого с помощью механического воздействия. Проведено математическое и компьютерное моделирование топологических микро- и наноструктур на поверхности металлических комплексов с управляемыми при лазерном воздействии конфигурациями. Выполненный анализ позволяет сделать вывод, на основе предложенных

Адрес для переписки

Рыжова Татьяна Викторовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Партизанский, 77,
220107, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 250-36-95
ryzhovatv@bntu.by

Address for correspondence

Ryzhova Tatiana V.
Belarusian National Technical University
77, Partizansky Ave.,
220107, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 250-36-95
ryzhovatv@bntu.by

процедур с процессами регулирования топологической структурой для рассмотренных поверхностных объектов при их лазерном синтезе, о перспективности данного направления, что связано с возможностью управления функциональными поверхностными характеристиками в требуемом направлении, в частности по их электрофизическим параметрам для различных изделий, в устройствах, используемых в энергетике.

Ключевые слова: электрофизика устройств систем энергетики, управляемые поверхностные характеристики при лазерном воздействии, металлоуглеродные комплексы, C–Au цепочечные структуры, микросвитки TiO₂, регулируемые теплофизические и электрофизические динамические процессы

Для цитирования: Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер. Ч. 2 / Т. В. Рыжова [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 1. С. 50–63. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-50-63>

Technologies for Improving the Operational Characteristics of Dynamic Gas-Liquid Thermal Power Plants with Controlled Laser Induction of Adjustable Local Configurations of Topological Micro- and Nanostructures on the Internal Metal Surface of Working Chambers

Part 2

T. V. Ryzhova¹⁾, D. D. Tumarkina²⁾, D. N. Bukharov²⁾, V. D. Samishkin²⁾, A. F. Lelekova²⁾, M. M. Arakelyan³⁾, A. O. Kucherik²⁾, S. M. Arakelyan²⁾

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

²⁾Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs (Vladimir, Russian Federation),

³⁾Yerevan State University (Yerevan, Republic of Armenia)

Abstract. The second part of the article presents a study and modeling of the electrophysical characteristics of parts with various purposes featuring a specific laser-induced configuration of micro- and nanostructural surface features on the product. The relevance of this study is due to the fact that during the operation of any power plant, the values of its electrophysical characteristics are an integral part of it. The conducted research enables control over these characteristics both in the input platform for power supply from corresponding generators to the installation and in the output energy used to ensure the operation of respective units, whose power supply is provided by energy installations of different classes during their operation in required modes, including extreme dynamic operating modes. This study specifically addresses demonstration circuits with prototypes of systems using microscrolls of 1D titanium dioxide structures in metal-carbon compounds (carbon – gold) under C–Au chain doping conditions. In this case, a three-stage process was implemented using laser ablation from a titanium target, synthesizing a thin porous titanium dioxide film and depositing it onto a demonstration quartz glass substrate. Subsequently, linear carbon chains, stabilized by gold nanoparticles at their edges, were introduced into the porous titanium dioxide film matrix by jet spraying, forming an array of microscrolls through mechanical action. Mathematical and computer modeling of topological micro- and nanostructures on the surfaces of metal complexes with laser-controlled configurations was performed. The conducted analysis allows us to draw a conclusion, based on the proposed procedures and processes regulating the topological structure of the considered surface objects during their laser synthesis, about the prospects of this direction, which is associated with the possibility

of controlling the functional surface characteristics in the required direction, particularly regarding their electrophysical parameters for various products used in energy devices.

Keywords: electrophysics of energy system devices, laser-controlled surface characteristics, metal-carbon complexes, C-Au chain structures, TiO₂ microscrolls, regulated thermophysical and electrophysical dynamic processes

For citation: Ryzhova T. V., Tumarkina D. D., Bukharov D. N., Samishkin V. D., Lelekova A. F., Arakelyan M. M., Kucherik A. O., Arakelyan S. M. (2026) Technologies for Improving the Operational Characteristics of Dynamic Gas-Liquid Thermal Power Plants with Controlled Laser Induction of Adjustable Local Configurations of Topological Micro- and Nanostructures on the Internal Metal Surface of Working Chambers. Part 2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 50–63. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-50-63> (in Russian)

Введение

Во второй части статьи представлено дальнейшее развитие исследований по топологическим микро- и наноструктурам на поверхности металлических комплексов с управляемыми при лазерном воздействии функциональными характеристиками и их моделированию на основе фрактального подхода, изложенного, в частности, в работах [1, 2].

Акцент сделан на рассмотрении топологических микросвитков диоксида титана с углеродно-золотым C–Au цепочным легированием, в частности при проведении моделирования структурных особенностей и управления электрофизическими характеристиками. При этом реализованы модели кластерных структур и цепочечных конфигураций для неоднородных объектов с разной топологией. Отдельно изучена электрофизика кластерных топологических структур с разной концентрацией атомов золота. В финале статьи кратко обсуждаются вопросы возможности разработки элементов и систем различного предназначения, включая электротехнику, микро- и нанoeлектронику и фотонику, на новых физических принципах как перспективное направление развития в самое ближайшее время сектора высокотехнологичных инновационных разработок, конкурентных на мировом уровне.

Топологические микросвитки диоксида титана с углеродно-золотым легированием – моделирование структурных особенностей и электрофизических характеристик

Кластерные структуры и модели для неоднородных объектов с разной топологией. Рассмотрим один из примеров другого класса неоднородных структур, которые являются весьма перспективными для различных приложений. Речь идет о микроструктурах диоксида титана, которые находят широкое применение в качестве инновационной элементной базы для электрофизики [3]. Так, образцы микросвитков диоксида титана с добавлением наночастиц металлов могут применяться как значимая альтернатива при разработке солнечных элементов [4]. Формирование таких кластерного типа объектов становится возможным благодаря наличию на их поверхности множества дефектов, которые способствуют усилению, в частности, электропроводимости, которая обсуждалась в [5]. Кроме того, в данной структуре этого материала наблюдается появление достаточно значительного фототока в случае облучения ее поверхности светом [6].

Экспериментально существует достаточно большое число методов получения систем микросвитков диоксида титана [7–9]. Одним из простых и удобных методов является трехэтапная схема [10], которая и использовалась нами.

На первом этапе методом лазерной абляции из титановой мишени синтезировалась тонкая пористая пленка диоксида титана. Она осаждалась на подложку из ИТО-стекла. Синтез пленки реализовывался на лазерной установке LDesigner F1. Мощность лазерного излучения составляла величину 10 Вт. Лазерное воздействие производилось на длине волны 1,06 мкм в импульсном режиме. Частота следования импульсов составляла 20 кГц, их длительность 100 нс. Использовался режим сканирования рабочей области облучения лазерным пучком диаметром 30 мкм со скоростью 15 мм/с. Время воздействия составляло 9 мин. На втором этапе методом струйного распыления (Spraying-Jet) в матрицу пористой пленки диоксида титана производилось распыление стабилизированных наночастицами золота по краям линейных цепочек углерода [11]. Это позволило улучшить оптические и электронные свойства данной пористой пленки. На третьем этапе из полученной пористой пленки формировался массив микросвитков, получаемый с помощью механического воздействия движущегося лезвия по заданной траектории методом лезвийной резки (blading-методом) [12].

Таким образом, были синтезированы образцы микросвитков диоксида титана с упорядоченной структурой и варьирующей степенью разветвления элементов. Исследование РЭМ-изображений таких образцов, полученных с помощью микроскопа Quanta 200 3D, показало, что микросвитки, образующие массивы, обладают разветвленной дендритной структурой (рис. 1, масштаб указан на рисунках).

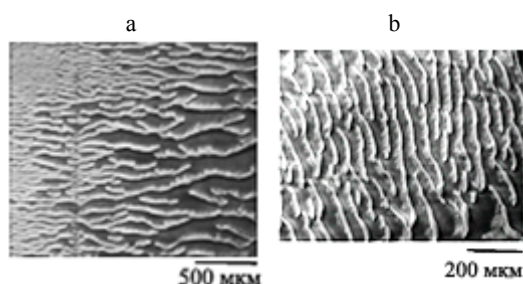


Рис. 1. РЭМ-изображение массива микросвитков с дендритной структурой в случае их формирования при расстоянии между микролезвием и поверхностью пленки порядка:

а – 10 мкм (указан масштаб 500 мкм); б – 15 мкм (указан масштаб 200 мкм)

Fig. 1. SEM-image of an array of microscrolls with a dendritic structure in the case of their formation at a distance between the microblade and the film surface of the order of:
a – 10 μm (the scale is 500 μm); b – 15 μm (the scale is 200 μm)

При этом оценивалась их фрактальная размерность. Процедура расчета с соответствующими ссылками на литературу приведена в первой части статьи, в данной части мы только кратко перечисляем базовые пункты.

При этом, например, для образца из рис. 1а оценка фрактальной размерности с использованием метода подсчета ячеек (boxcounting), реализованного в среде MATLAB 7, составила значение 1,74, что позволило достаточно четко отнести рассматриваемую систему к дендритной структуре.

Средний диаметр микросвитков в системе из рис. 1а варьировался около значения 9 мкм, а расстояния между элементами находились в диапазоне от 32 до 137 мкм с допуском порядка 10 %. На рис. 1б значение среднего диаметра микросвитка составило величину порядка 16 мкм.

Таким образом, можно утверждать, что диаметр микросвитков, а также их высота составляли величины порядка расстояния между подложкой микрорезвием, используемым при формировании микросвитков.

Применение возможностей имитационного моделирования позволяет описать наблюдаемые геометрические особенности этих структур, оказывающие влияние на функциональные характеристики полученных образцов.

Для описания таких структурных особенностей в полученных образах применялся подход феноменологического имитационного моделирования, когда исследуемое явление представлялось в общем виде [13], а модель подбиралась на основе сходства модели и реального моделируемого объекта [14].

Для описания торцевого сечения микросвитка использовалось уравнение спирали Архимеда [15]:

$$x = \Theta_t^2 \cos(\Theta_t); \quad y = \Theta_t^2 \sin(\Theta_t),$$

где Θ_t – текущий угол поворота.

Для задания шероховатости и неоднородности для полученной структуры применяли диффузионное приближение, основанное на решении уравнения Лапласа при постоянном коэффициенте диффузии d :

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = d \left(\frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} \right),$$

где $\partial u(x, y, t)$ – концентрация вещества в точке декартова пространства с координатами x, y в момент времени t в дискретной области с наложенной равномерной сеткой.

Уравнение диффузии в дискретном виде решалось с использованием дискретного клеточного автомата (КА). Он формировался из набора правил, которые определяли, как на каждую ячейку повлияют некоторые соседние ячейки расчетной области, называемые окрестностью соседства. Текущая ячейка являлась соседом другой, если у нее была возможность прямо воздействовать на другую ячейку согласно заданному правилу за один шаг, что обсуждалось в первой части данной статьи.

В принципе, правило КА могло бы использовать любое число соседей. Однако соображения эффективности диктуют практический предел числа

и длины прямых связей соседей. В частности, для формирования двумерных КА одной из наиболее популярных окрестностей является окрестность Неймана с ближайшими четырьмя соседями для каждой ячейки. Тогда правило функционирования КА таково, что на каждой итерации выбирается случайная ячейка, которая меняется своим значением равновероятно с одним из своих соседей.

Структурные неоднородности генерировались итерационно, начиная от стартовой фигуры. Множество состояний ячеек расчетной области формировалось из двух возможностей: 1 – ячейка занята, 0 – ячейка свободна. Правило КА задавалось следующим образом: если рассматриваемая ячейка свободна и одна из ее соседей в рамках окрестности соседства Неймана занята, то с заданной вероятностью p она становилась занятой. Схема разнотных итераций КА со стартовой структурой в виде квадрата в центре дается на соответствующем изображении при проведении анализа.

Основным параметром модели являлась вероятность p ячейки быть занятой, которая соответствовала нормированному коэффициенту диффузии. Данная модель в рамках КА позволяет задавать тип образующих структуру частиц. Это дает возможность вводить в структуру микросвитков примесные атомы, например золотые наночастицы, что принципиально для различных приложений.

В нашем случае частица, маркированная значением 1, определялась как диоксид титана, частица с маркировкой 2 – золотая наночастица. Тип модельной частицы устанавливался с заданной вероятностью, определяемой в соответствии с концентрацией золотых частиц в системе p_g . Тогда вероятность частицы быть из состава диоксида титана определялась как разность $p_{tio} = 1 - p_g$.

Для описания вида сверху массива микросвитков применялась процедура в рамках универсальной диффузионной модели, позволяющей генерировать дендритные структуры. Модельное приближение рассматривалось в рамках подхода диффузионно-ограниченной агрегации (DLA), реализованной в ходе итерационного процесса. Инициализация модели заключалась в размещении стартовой структуры на нижней границе расчетной области. В начале каждой итерации в расчетную область вводилась одна модельная частица.

Эта частица совершала случайное блуждание по направлению к нижней границе расчетной области – двигалась вниз, влево или вправо на одну ячейку за один шаг блуждания. Формирование модельной структуры реализовывалось в рамках КА с окрестностью Неймана по следующему правилу: если в одной из четырех клеток окрестности соседства во время смещения частицы появлялась занятая ячейка, то с заданной вероятностью s производилась агрегация с ней. Как только частица агрегировала, то текущая итерация заканчивалась.

На вертикальных границах расчетной области реализовывались периодические граничные условия, заключающиеся в отражении от них модель-

ной частицы при ее движении. На нижней границе реализовывалось условие агрегации, когда текущая частица на ней фиксировалась и становилась зародышевой структурой для формирования нового модельного микросвитка.

Варьирование основных имитационных параметров модели осуществлялось с помощью следующих двух показателей: вероятности агрегации частиц и вероятности их единичных случайных смещений. Это позволяет сгенерировать модели различной структуры из таких объектов, а также задавать преимущественное направление роста этих структур.

Описанные выше модели были реализованы в среде MATLAB на квадратной расчетной области в относительных единицах. На рис. 2 приведена модель торцевого сечения микросвитка с шероховатой поверхностью, соответствующая пористой структуре исходной поверхности системы. Модели торцевого сечения микросвитка с шероховатой поверхностью могут учитываться при рассмотрении электрофизических и оптических свойств, обусловленных особенностями геометрии объекта. Из рис. 2 можно оценить влияние модельного нормированного коэффициента диффузии p . Так, при одинаковом количестве итераций для более высоких значений p толщина стенок генерируемой структуры становится соответственно больше. На рис. 2а приведена модель торцевого сечения при $p = 0,05$, на рис. 2б – при $p = 0,01$. Кроме этого, на рис. 2с приведен случай учета концентрации Au-наночастиц.

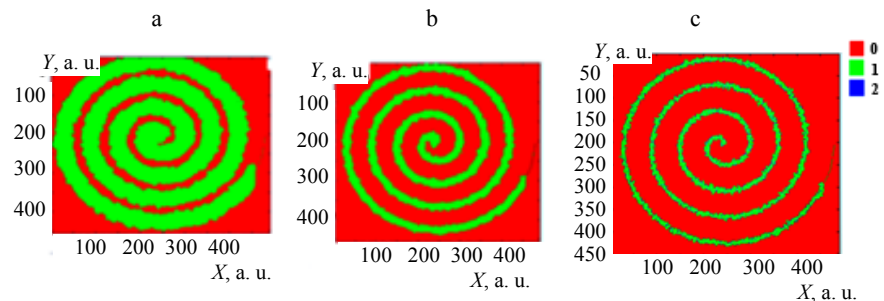


Рис. 2. Модели торцевого сечения микросвитка при: а – $p = 0,05$; б – $0,01$.

Для случая учета типа модельной частицы изображения отмечено цветом:

0 – подложка, 1 – диоксид титана, 2 – золото (с) (см. ниже рис. 3)

Fig. 2. Models of the end section of the microscroll at: а – $p = 0.05$; б – 0.01 .

In case of taking into account the type of model particle, the images are marked with color:

0 – substrate, 1 – titanium dioxide, 2 – gold (c) (see below Fig. 3)

Переход к абсолютным единицам позволяет выполнить сравнение модели с реальной структурой. Для рис. 2 масштабный коэффициент можно положить равным 1,1 мкм, тогда абсолютный расчетный диаметр будет порядка 10 мкм. По такому алгоритму расчетные диаметры будут согласованы со средним значением для измеренных в эксперименте образцов.

На рис. 3 приведены модели вида сверху для микросвитков в приближении DLA при различной концентрации золотых наночастиц (с) в относи-

тельных единицах. Синим цветом на рис. 3 отмечены модельные частицы из золота. Рис. 3а получен при концентрации золотых частиц $c = 20\%$, рис. 3б – при $c = 70\%$.

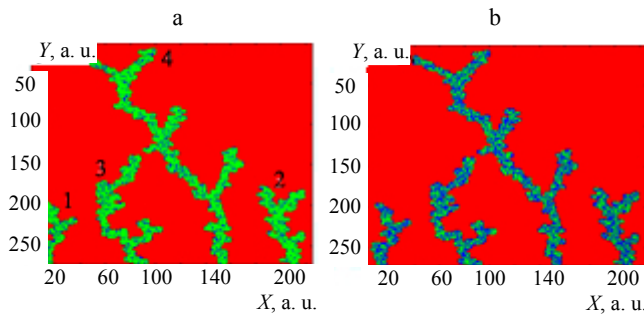


Рис. 3. DLA модель системы микросвитков при: а – $c = 20\%$, б – 70%

Fig. 3. DLA model of the micro scrolls system at: а – $c = 20\%$, б – 70%

Основной параметр модели – вероятность агрегации (s) оказывает влияние на модельную структуру. Его высокие значения позволяют генерировать более разветвленные структуры. В случае низких значений структура микросвитка стремится к типу линейного объекта. Так, на рис. 3 аналогичные фрагменты изображения фигур с обозначением (показано только на рис. 3а) цифрами 1, 2 получены при $s = 0,3$, фрагмент 3 – при $s = 0,6$, фрагмент 4 – при $s = 0,8$.

Расчетная фрактальная размерность модельного массива структур по изображению на рис. 3а составляет величину 1,77. Кроме того, в модели учитывалась концентрация наночастиц золота как одного из основных параметров, оказывающих влияние на функциональные характеристики (например, электропроводимость) образца.

Разница фрактальных размерностей модельной структуры и реального полученного в эксперименте образца не превосходит величину 0,02, что свидетельствует об относительной погрешности моделирования порядка 1 %.

Аналогичный переход к абсолютным единицам позволил сравнить длины модельных структур и образцов, полученных в эксперименте. Например, для рис. 3а, положив масштабный коэффициент равным среднему диаметру микросвитков 9 мкм, получим абсолютные длины модельных образцов, не превосходящие 2,25 мм и согласующиеся с максимальным значением для измеренных реальных образцов.

Таким образом, реализованное соответствие фрактальных размерностей, а также размеров (длин) моделей структур с измеренными величинами позволяет ожидать также и соответствия значений для расчетных и измеренных функциональных характеристик (например, электрофизических или оптических), обусловленных размерными структурными эффектами.

Электрофизика кластерных цепочечных топологических структур с разной концентрацией атомов золота. Покажем, каким образом имен-

но электрофизические характеристики зависят от концентрации наночастиц металла (золота, в нашем случае) в подобных линейчатых структурах.

Электрические свойства металлоуглеродных цепочечных структур на плоской поверхности рассчитываются на основе собственного сопротивления сегментов цепочки R_{int} и контактного сопротивления между цепочками R_c [16]

$$R = R_{int} + R_c.$$

Внутреннее сопротивление на плоскости (в горизонтальном направлении при рассмотрении в общем случае 3D структуры) между двумя соседними точками в цепочке (ее по аналогии с углеродными нанотрубками будем отмечать индексом CNT) может быть оценено в виде

$$R_{int} = \frac{4L}{\pi(\sigma_{CNT} + \delta_{metal}\sigma_{metal})D_{CNT}^2},$$

где L – средняя длина цепочки; δ_{metal} – средняя концентрация наночастиц металла в цепочке; D_{CNT} – диаметр наночастицы; σ_{CNT} – собственная электропроводимость цепочки; σ_{metal} – то же металлических частиц соответственно.

Другой компонент сопротивления – контактное сопротивление R_c между двумя рассматриваемыми цепочками (здесь можно говорить о туннельном эффекте с прыжковым механизмом электропроводимости для зарядовых носителей) определяется по соотношению Ландауэра – Бюттикера (LB) [17]

$$R_c \approx \frac{h}{2e^2MT},$$

где e – заряд электрона; h – постоянная Планка; M – номер контактного канала; T – вероятность передачи зарядового носителя (электрона), которая может быть рассчитана в виде [18]:

$$T = \exp\left(\frac{-d_{vdw}}{h / \sqrt{8m_e} |w_{metal} - w_{CNT}|}\right) \text{ при } 0 \leq d \leq D_{CNT} + D_{metal} + 2d_{vdw},$$

где m_e – масса электрона; d – расстояние между осями двух цепочечных объектов (нанотрубок); w_{metal} , w_{CNT} – работы выхода зарядов из металлических наночастиц и нанотрубок соответственно; d_{vdw} – Ван-дер-Ваальсово расстояние [19].

Результаты экспериментальных измерений приведены на рис. 4 для двух использованных схем измерения.

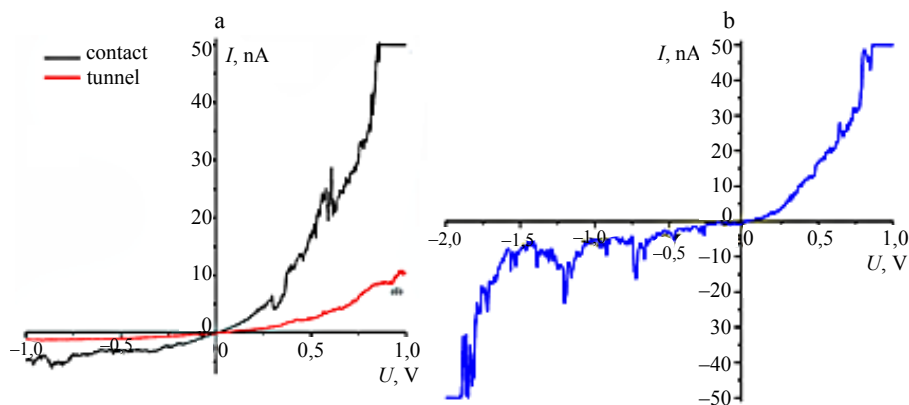


Рис. 4. Измеренные зависимости для вольт-амперных характеристик (ВАХ):

ВАХ – зависимость для двух использованных схем измерения;

а – контактная и туннельная; б – туннельная ВАХ при изменении полярности напряжения на подводимых микроконтактах к образцу

Fig. 4. Measured dependencies for the Volt-Ampere Characteristics (VAC):

VAC – dependence for two used measurement schemes: a – contact and tunnel;

b – tunnel VAC when changing the voltage polarity on the microcontacts applied to the sample

Расчеты проводились нами для значений: $L = 20$ мкм; $D_{CNT} = 10$ мкм; $\sigma_{metal} = 4,16 \cdot 10^7$ С/м; $d_{vdw} = 170 \cdot 10^{-12}$ м; $w_{metal} = 5,1$ эВ; $w_{CNT} = 4,7$ эВ с варьированием значений δ_{metal} . При этом при моделировании туннельного механизма электропроводимости анализировалась зависимость как для положительных, так и отрицательных значений областей прикладываемых электронапряжений (ср. с рис. 4б).

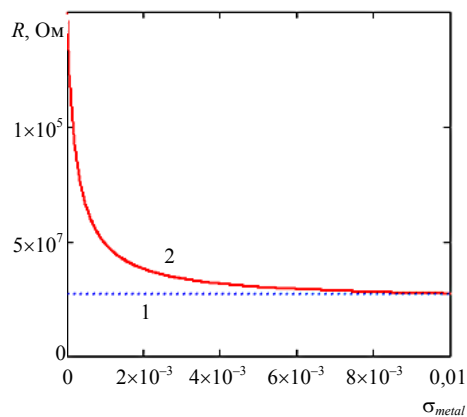


Рис. 5. Зависимость среднего электросопротивления (вертикальная ось) от концентрации металлических наночастиц (золота) в цепочке (указана на горизонтальной оси в долях):

1 – измеренное значение; 2 – модельные данные

Fig. 5. Dependence of the average electrical resistance (vertical axis) on the concentration of metal nanoparticles (gold) in the chain (indicated on the horizontal axis in fractions):

1 – measured value; 2 – model data

Оценка среднего значения электросопротивления (рис. 5) на основе данных из рис. 4b составила величину $2,7 \cdot 10^7$ Ом для концентрации наночастиц золота в цепочке $\delta_{metal} \leq 50$ %, но наиболее точные расчетные результаты с погрешностью порядка 10 % достигались в случае, не превосходящем 1,39 %.

Таким образом, приведенные выше соотношения позволяют формировать модели электропроводимости цепочечных структур. При этом уже малое значение концентрации наночастиц золота в таких структурах достаточно для управления электрофизическими характеристиками образцов. Это является принципиальной возможностью для регулирования электрофизики с требуемыми значениями параметров подобных объектов для различных приложений.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены вопросы и модели синтеза поверхностных микро- и наноструктур определенной конфигурации на примере дендритных структур и дефектов с управляемой топологией при лазерной абляции с поверхности металлических комплексов в условиях определенных режимов лазерного воздействия. Подобные технологии представляют значительный интерес при лазерной обработке деталей энергетических установок, в частности для управления в их периферийных блоках обеспечения функционирования установок с соответствующими электрофизическими характеристиками требуемого значения.

2. Приведены результаты экспериментального синтеза системы микросвитков диоксида титана с атомами золота в виде ассоциированных Au-наночастиц, полученных оригинальным трехэтапным методом синтеза. Выполнена оценка пространственных размеров и фрактальных размерностей данных цепочечных структур в таких образцах в рамках имитационной модели в приближении хорошо известных подходов математического и компьютерного моделирования клеточного автомата и диффузионно-ограниченной агрегации в окрестности Неймана. По данной процедуре проанализирована модель торцевого сечения микросвитка в приближении спирали Архимеда с учетом шероховатости поверхности образца. Полученные величины погрешности моделирования в сравнении с экспериментальными данными показали адекватную применимость предложенных моделей для описания систем микросвитков. Проведены эксперименты по электрофизике подобных кластерных топологических структур с разной концентрацией атомов золота в таких цепочных объектах.

3. Рассмотренные объекты с управляемой микро- и нанотопологией при их лазерном синтезе на поверхности материала представляют значительный интерес для различных приложений в аспекте регулирования в заданном направлении функциональными/электрофизическими характеристиками таких структур. Это должно позволить разрабатывать элементы

и системы различного предназначения, включая электротехнику, микро- и наноэлектронику и фотонику, на новых физических принципах, в том числе для энергетических установок – прототипов различных устройств с требуемыми электрофизическими характеристиками.

4. Проведенные исследования демонстрируют универсальность данного подхода поверхностной инженерии для различных материалов с легирующими химическими элементами и комплексами практически любого состава, включая синтез тонких пленок металлоуглеродных и алмазоподобных соединений широкого класса. Такие структуры относительно легко формируются с помощью лазерной абляции на ответственных деталях теплоэнергетических генераторов разной конструкции с оптимизацией их функциональных характеристик в заданном направлении, которое получит свое развитие в самое ближайшее время как сектор высокотехнологичных инновационных разработок, конкурентных на мировом уровне, в том числе и в сфере энергетики.

Работа выполнена в рамках Государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0019, Госзадание ВлГУ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации / Т. В. Рыжова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172>.
2. Самопроизвольное зарастание трещиноватости в рабочих камерах энергетических газожидкостных тепловых установок – диффузионные динамические процессы / Т. В. Рыжова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 4. С. 345–362. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-345-362>.
3. Нанотрубки диоксида титана: синтез, структура, свойства и применение / А. А. Ремпель, А. А. Валеева, А. С. Вохминцев, И. А. Вайнштейн // Успехи химии. 2021. Т. 90, № 11. С. 1397–1414. <https://doi.org/10.1070/RCR4991>.
4. Advancements in Black Titanium Dioxide Nanomaterials for Solar Cells: a Comprehensive Review/ T. C. Selema, T. D. Malevu, M. R. Mhlango [et al.] // Emergent Materials. 2024. Vol. 7, No 6. P. 2163–2188. <http://doi.org/10.1007/s42247-024-00731-z>.
5. Effect of Defects On Photocatalytic Activity of Rutile TiO₂ Nanorods / Z. Zhao, X. Zhang, G. Zhang [et al.] // Nano Research. 2015. Vol. 8, No 12. P. 4061–4071. <https://doi.org/10.1007/s12274-015-0917-5>.
6. Barlow, Z. Surface and Defect Engineered Polar Titanium Dioxide Nanotubes as an Effective Polysulfide Host for High-Performance Li–S Batteries / Z. Barlow, Z. Wei, R. Wang // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 309. P. 128316. <http://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128316>.
7. One-Step Hydrothermal Synthesis of Anatase TiO₂ Nanotubes for Efficient Photocatalytic CO₂ Reduction / K. Alkanad, A. Hezam, N. Al-Zaqri [et al.] // ACS Omega. 2022. Vol. 7, No 43. P. 38686–38699. <http://doi.org/10.1021/acsomega.2c04211>.
8. Handbook of Sol-Gel Science and Technology / eds: L. Klein, M. Aparicio, A. Jitianu. 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2018. 3828 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32101-1>.
9. A Review on TiO₂-based Nanotubes Synthesized Via Hydrothermal Method: Formation Mechanism, Structure Modification, and Photocatalytic Applications / N. Liu, X. Chen,

- J. Zhang, J. W. Schwank // *Catalysis Today*. 2014. Vol. 225. P. 34–51. <http://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.10.090>.
10. Titanium-Based Metasurfaces for Optoelectronics / S. Kavokina, V. Samyshkin, J. Cao [et al.] // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 14, No 1. Art. 56. <http://doi.org/10.3390/nano14010056>.
11. Electric Field Assisted Alignment of Monoatomic Carbon Chains/ S. Kutrovskaya, I. Chestnov, A. Osipov [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, No 1. Art. 9709. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65356-8>.
12. Агафонова, Н. А. Математические основы феноменологического метода построения аналитических моделей теплоэнергетических объектов управления / Н. А. Агафонова // *Вестник ИГЭУ*. 2007. № 4. С. 69–71.
13. Левина, А. П. Обзор метода имитационного моделирования / А. П. Левина // *Современная техника и технологии*. 2017. № 5 URL: <https://technology.snauka.ru/2017/05/13530>. (дата обращения: 28.04.2025).
14. Savin, A. V. Using Spiral Chain Models for Study of Nanoscroll Structures / A. V. Savin, R. A. Sakovich, M. A. Mazo // *Physical Review B*. 2018. Vol. 97, No 16. P. 165436. <http://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.165436>.
15. Евсеев, А. А. Клеточно-автоматное моделирование диффузионных процессов на триангуляционных сетках / А. А. Евсеев, О. И. Нечаева // *Прикладная дискретная математика*. 2009. № 4. С. 72–83.
16. Development of Kovacs Model for Electrical Conductivity of Carbon Nanofiber–Polymer Systems / S. K. Arjmandi, J. Khademzadeh Yeganeh, Y. Zare, K. Y. Rhee // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26139-5>.
17. Cornean, H. D. A Rigorous Proof of the Landauer–Büttiker Formula / H. D. Cornean, A. Jensen, V. Moldoveanu // *J. Math. Phys.* 2005. Vol. 46, No 4. P. 042106. <http://doi.org/10.1063/1.1862324>.
18. Modeling and Characterization of the Electrical Conductivity on Metal Nanoparticles/Carbon Nanotube/Polymer Composites / Y. Wang, S. Lu, W. He [et al.] // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, No 1. Art. 10448. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14596-x>.
19. Batsanov, S. S. Calculation of van der Waals Radius of Atoms From Bond Distances / S. S. Batsanov // *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*. 1999. Vol. 468, No 1–2. P. 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0166-1280\(99\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0166-1280(99)00077-9).

Поступила 03.04.2025 Подписана в печать 02.09.2025 Опубликовано онлайн 30.01.2026

REFERENCES

1. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M. (2024) Dynamic Processes of Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172> (in Russian).
2. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M. (2024) Spontaneous Overgrowth of Jointing in the Working Chambers of Power Gas-Liquid Thermal Installations – Diffusion Dynamic Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (4), 345–362. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-345-362> (in Russian).
3. Rempel A. A., Valeeva A. A., Vokhmintsev A. S., Weinstein I. A. (2021) Titanium Dioxide Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications. *Russian Chemical Reviews*, 90 (11), 1397–1414. <https://doi.org/10.1070/rcr4991>.
4. Selema T. C., Malevu T. D., Mhlongo M. R., Motloung S. V., Motaung T. E. (2024) Advancements in Black Titanium Dioxide Nanomaterials for Solar Cells: a Comprehensive Review. *Emergent Materials*, 7 (6), 2163–2188. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00731-z>.
5. Zhao Z., Zhang X., Zhang G., Liu Z., Qu D., Miao X., Feng P., Sun Z. (2015) Effect of Defects on Photocatalytic Activity of Rutile TiO₂ Nanorods. *Nano Research*, 8 (12), 4061–4071. <https://doi.org/10.1007/s12274-015-0917-5>.

6. Barlow Z., Wei Z., Wang R. (2023) Surface and Defect Engineered Polar Titanium Dioxide Nanotubes as an Effective Polysulfide Host for High-Performance Li-S Batteries. *Materials Chemistry and Physics*, 309, 128316. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128316>.
7. Alkanad K., Hezam A., Al-Zaqri N., Bajiri M. A., Alnaggar G., Drmosh Q. A., Almukhlifi H. A., Neratur Krishnappagowda L. (2022) One-Step Hydrothermal Synthesis of Anatase TiO₂ Nanotubes for Efficient Photocatalytic CO₂ Reduction. *ACS Omega*, 7 (43), 38686–38699. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04211>.
8. Klein L., Aparicio M., Jitianu A. (Eds.). (2018) *Handbook of Sol-Gel Science and Technology*. 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer. 3828. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32101-1>.
9. Liu N., Chen X., Zhang J., Schwank J. W. (2014) A Review on TiO₂-Based Nanotubes Synthesized via Hydrothermal Method: Formation Mechanism, Structure Modification, and Photocatalytic Applications. *Catalysis Today*, 225, 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.10.090>.
10. Kavokina S., Samyshkin V., Cao J., Abramov A., Osipov A., Essaka S. P., Khalimov N., Bodunov D., Kavokin A. (2023) Titanium-Based Metasurfaces for Optoelectronics. *Nanomaterials*, 14 (1), 56. <https://doi.org/10.3390/nano140100569>.
11. Kutrovskaya S., Chestnov I., Osipov A., Samyshkin V., Sapegina I., Kavokin A., Kucherik A. (2020) Electric Field Assisted Alignment of Monoatomic Carbon Chains. *Scientific Reports*, 10 (1), 9709. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65356-8>.
12. Agafonova N. A. (2007) Mathematical Foundations of the Phenomenological Method for Constructing Analytical Models of Thermal Power Control Facilities. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, (4), 69–71 (in Russian).
13. Levina A. P. (2017) Review of the Simulation Modeling Method. *Sovremennaya Tekhnika i Tekhnologii = Modern technics and technologies*, (5). Available at: <https://technology.snauka.ru/2017/05/13530> (accessed 28 April 2025) (in Russian).
14. Savin A. V., Sakovich R. A., Mazo M. A. (2018) Using Spiral Chain Models for Study of Nanoscroll Structures. *Physical Review B*, 97 (16), 165436. <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.165436>.
15. Evseev A. A., Nechaeva O. I. (2009) Cellular Automaton Modeling of Diffusion Processes on Triangulation Grids. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika = Applied Discrete Mathematics*, (4), 72–83 (in Russian).
16. Arjmandi S. K., Khademzadeh Yeganeh J., Zare Y., Rhee K. Y. (2023) Development of Kovacs Model for Electrical Conductivity of Carbon Nanofiber–Polymer Systems. *Scientific Reports*, 13, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26139-5>.
17. Cornean H. D., Jensen A., Moldoveanu V. (2005) A Rigorous Proof of the Landauer–Büttiker formula. *Journal of Mathematical Physics*, 46 (4), 042106. <https://doi.org/10.1063/1.1862324>.
18. Wang Y., Lu S., He W., Gong S., Zhang Y., Zhao X., Fu Y., Zhu Z. (2022) Modeling and Characterization of the Electrical Conductivity on Metal Nanoparticles/Carbon Nanotube/Polymer Composites. *Scientific Reports*, 12 (1), 10448. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14596-x>.
19. Batsanov S. S. (1999) Calculation of van der Waals radii of Atoms From Bond Distances. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 468 (1–2), 151–159. [https://doi.org/10.1016/s0166-1280\(99\)00077-9](https://doi.org/10.1016/s0166-1280(99)00077-9).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-64-76>

УДК: 621.311.25:621.039

Расчет влияния отравления на производительность пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР

В. В. Сорокин¹⁾

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

Реферат. На современной атомной электростанции предусмотрены локализирующие системы безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в предусмотренных проектом границах. Для защиты границы применяется система удаления водорода, включающая пассивные автокаталитические рекомбинаторы. Система предотвращает образование горючих и взрывоопасных концентраций водорода за счет превращения последнего в воду в ходе реакции с кислородом воздуха на катализаторе. Основным материалом катализатора – обычно платина с долей палладия. Наряду с водородом аварийная среда содержит специфические вещества, известные как каталитические яды. Яды уменьшают активность катализатора и снижают производительность рекомбинаторов. Для платинового катализатора опасны вещества-доноры пары электронов, например теллур. Количества выделившихся каталитических ядов на стадии плавления активной зоны достаточно для снижения активности катализатора. Уровень снижения оценен расчетами. Яды в аэрозольной форме опасны в зоне отрывных течений у поверхности каталитического элемента. Яды в атомарной (молекулярной) форме опасны для катализатора по всей длине элемента. Яд вызывает постепенное снижение производительности рекомбинаторов с ростом количества прореагировавшего водорода. Скорость отравления зависит от типа и концентрации яда, массы активной платины на единице поверхности катализатора. Расчетом показана возможность снижения производительности пассивного каталитического рекомбинатора водорода вследствие отравления катализатора в условиях аварии на АЭС с ВВЭР. Представлены количественные данные по отравлению рекомбинаторов типа FR и РВК. Эффект отравления следует учитывать при выборе производительности системы удаления водорода локализирующей системы безопасности энергоблока АЭС с ВВЭР.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, тяжелые аварии, водородная безопасность, локализирующая система безопасности, система удаления водорода, каталитические рекомбинаторы, катализатор, каталитические яды, производительность, расчеты

Для цитирования: Сорокин, В. В. Расчет влияния отравления на производительность пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Сорокин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 1. С. 64–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-64-76>

Адрес для переписки
Сорокин Владимир Владимирович
Белорусский национальный
технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Address for correspondence
Sorokin Vladimir V.
Belarusian National
Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Calculation of the Impact of Poisoning Effect on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of a Localizing Safety System at a Nuclear Power Plant Equipped with Water-Cooled Water Reactors

V. V. Sorokin¹⁾

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

Abstract. A modern Nuclear Power Plant (NPP) is equipped with localizing safety systems to contain radioactive substances and ionizing radiation within the boundaries specified by the design in the event of an accident. To protect the border, a hydrogen removal system is used, including passive autocatalytic hydrogen recombiners. The system prevents the formation of flammable and explosive concentrations of hydrogen by converting hydrogen into water during a reaction with atmospheric oxygen on a catalyst. The main catalyst material is usually platinum with a proportion of palladium. Along with hydrogen, the emergency environment contains specific substances known as catalyst poisons. Poisons reduce catalyst activity and decrease the performance of recombiners. Electron pair donor substances, such as tellurium, are dangerous for the platinum catalyst. The amount of released catalytic poisons at the stage of active zone melting is sufficient to reduce the activity of the catalyst. The level of reduction is estimated by calculations. Aerosol poisons are dangerous in the zone of separated flows near the surface of the catalytic element. Poisons in atomic (molecular) form are dangerous to the catalyst along the entire length of the element. The poison causes a gradual decrease in the productivity of recombiners as the amount of reacted hydrogen increases. The rate of poisoning depends on the type and concentration of the poison, and the mass of active platinum per unit surface area of the catalyst. The calculation shows the possibility of a decrease in the productivity of a passive catalytic hydrogen recombinder due to catalyst poisoning under accident conditions at a Nuclear Power Plant with Water-Moderated Water-Cooled Reactors. Quantitative data on the poisoning of recombiners of the FR- and RVK-types are presented. The poisoning effect should be taken into account when selecting the performance of the hydrogen removal equipment of the localizing safety system for a power unit at a Nuclear Power Plant with Water-Moderated Water-Cooled Reactors.

Keywords: Nuclear Power Plant, Water-Moderated Water-Cooled Reactors, severe accidents, hydrogen safety, localizing safety system, hydrogen removal system, catalytic recombiners, catalyst, catalytic poisons, performance, calculations

For citation: Sorokin V. V. (2026) Calculation of the Impact of Poisoning Effect on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of a Localizing Safety System at a Nuclear Power Plant Equipped with Water-Cooled Water Reactors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 64–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-64-76> (in Russian)

Введение

На современной атомной электростанции предусмотрены локализующие системы безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в предусмотренных проектом границах. Границу системы образует герметичное ограждение (ГО), внутри которой формируется зона локализации. Для защиты ГО от разрушения и поддержания его работоспособности необходимо решить проблему, связанную с накоплением и возможным воспламенением водорода при тяже-

лой аварии. Сопутствующие эффекты повышения давления и температуры способны разрушить ограждение.

В проекте АЭС с ВВЭР предусмотрена система удаления водорода, включающая пассивные автокаталитические рекомбинаторы. Внутри корпуса рекомбинатора размещены каталитические элементы. Корпус представляет собой вертикальный канал, сообщающийся через открытые верхний и нижний концы с объемом зоны локализации. При наличии водорода в атмосфере на каталитических элементах происходит химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением теплоты. Формируется устойчивый восходящий конвективный поток, обеспечивающий поступление газовой смеси к катализатору и отвод продуктов реакции. В результате работы рекомбинаторов концентрация водорода внутри ГО снижается. Пассивный принцип действия, а также независимость функциональных элементов системы от других систем энергоблока и друг от друга обеспечивают ей высокую степень надежности [1–3]. В качестве катализатора обычно используется платина с добавкой палладия.

При обосновании работоспособности системы удаления водорода следует оценить ее действие в сложных условиях тяжелой аварии. Плавление топлива сопровождается разрушением стенок тепловыделяющих элементов, топливных таблеток, выходом в атмосферу продуктов деления. Также в атмосферу попадают продукты разложения других материалов, находящихся в зоне локализации. Среди них могут оказаться специфические субстанции, способные уменьшать активность катализатора (отравлять), известные как каталитические яды. Вследствие отравления снижается производительность рекомбинаторов.

Анализ научной литературы и технических документов показал, что однозначная количественная оценка снижения производительности не установлена, а в части экспериментальной проверки проведены многочисленные разнонаправленные исследования часто с противоречивыми или трудно интерпретируемыми результатами. Йод, например, летуч, и его много как в составе продуктов деления, так и в атмосфере зоны локализации. Из литературы по химии известно, что йод отравляет платиновый катализатор [4]. Отравление платинового катализатора йодом в рекомбинаторе наблюдали в [5], не наблюдали без выяснения, могло или нет проявиться отравление в имевшихся условиях, в [6], установили отсутствие эффекта в [3, 7]. Недостаток информации сказывается на практике [8–10], растет неопределенность количественных оценок безопасности [11].

Наблюдались яды в молекулярных формах, как сравнительно легко удаляемые с поверхности катализатора и не препятствующие дальнейшей его работе, так и входящие в прочную связь с катализатором, вплоть до его невозможности дезактивации [12] в ходе штатного технологического процесса. Также известны яды, препятствующие доступу реагентов к катализатору (кокс, отложения). Нагрев катализатора рекомбинатора водорода на 20–30 °С выше температуры атмосферы решает проблему удаления

воды [13], до 117 °С – монооксида углерода [14] (или до более высокой температуры, по данным [15]). Прогрев и продувка катализатора в присутствии водорода, подаваемого из баллона, предусмотрены для восстановления активности каталитических элементов, которая, согласно наблюдениям, снижается со временем при эксплуатации устройства в режиме ожидания. Последствия невозможности дезактивации устраняются заменой каталитических элементов (в ходе аварии реализовать мероприятие невозможно).

Производитель рекомбинатора обычно сообщает список ядов, в отношении которых он проверен и показал необходимую устойчивость [2, 3]. В проекте энергоблока АЭС рекомбинаторы используются исходя из характеристик, указанных производителем [1].

Компания AECL (Канада) являлась одной из первых организаций в мире, проводившей комплексные исследования по проблеме водородной безопасности [16]. Проверялась и устойчивость рекомбинаторов к ядам. Анализ проводился для тяжелых аварий. Определено отсутствие вредного влияния залива устройства спреем спринклерного раствора. Проверено действие ядов: йода, йодметила, гидразина, хлора, хлороводорода, монооксида углерода. Вредного эффекта не обнаружено. При испытании в среде аэрозоля облученного и необлученного топлива также не обнаружено снижения производительности. Каталитические элементы проверялись не в составе рекомбинатора, а в составе экспериментального участка. Следует отметить, что в реакторах на тяжелой воде типа CANDU степень деградации активной зоны при тяжелой аварии гораздо меньше, чем у PWR, как и аварийные выходы водорода. Выгорание и остаточное тепловыделение топлива также ниже вследствие использования природного или слабо обогащенного урана в качестве делящегося материала и непрерывных перегрузок в ходе кампании. Проблема отравления не стоит остро.

Известны ответы представителей оператора второго блока АЭС «Индиана-Пойнт» (США) национальному регулятору (US Nuclear Regulatory Commission), в которых содержатся информация и пояснения, уточняющие отчет по обоснованию безопасности блока в части влияния ядов на каталитические рекомбинаторы. Оператор описывает каталитические яды [17], приводит их классификацию, оценку скорости снижения реакции на отравленном катализаторе вдвое, сообщает, что для эффекта отравления надо иметь высокую концентрацию яда в течение продолжительного времени, чего обычно нет на АЭС с PWR. Концентрация водорода в контейнменте не может превысить 2 об. %, что неопасно независимо от наличия или отсутствия ядов.

Обобщение экспериментальных данных по отравлению катализаторов (платиновых и палладиевых) проведено в [6]. В работе выяснено, что осаждение молекулярных форм на поверхность катализатора идет существенно интенсивнее, чем аэрозольных; замена инертного компонента атмосферы экспериментальной установки (азот) водяным паром (при плотности, существенно меньшей плотности насыщенного пара) не снижает интен-

сивности рекомбинации, рекомбинацией управляет дефицитный реагент из пары кислород и водород. Определенных результатов по отравлению катализатора в [6] не получено. В итоге высказано мнение о возможной незначительной роли ядов (применительно к АЭС с PWR).

При анализе вопроса о влиянии ядов в случае АЭС с ВВЭР желательно установить количественную сторону эффекта, поскольку удельные показатели ВВЭР выше, чем у PWR, а среди ВВЭР ВВЭР-1200 отличается большей мощностью и большим уровнем выгорания топлива. По оценкам, выходы водорода при авариях на блоках АЭС с ВВЭР могут достигать опасных значений [18, 19]. Расчеты будем проводить для конкретных моделей рекомбинаторов типа FR (AREVA) и РБК (Русские энергетические технологии), которыми часто комплектуются системы удаления водорода энергоблоков с ВВЭР. В составе Белорусской АЭС эксплуатируются два энергоблока с ВВЭР-1200, оснащенных рекомбинаторами РБК-3 и РБК-4.

Каталитические яды в атмосфере герметичного ограждения

В условиях нормальной эксплуатации топливная таблетка удерживает в своей структуре до 98 % продуктов деления. Потеря плотности оболочки ТВЭЛ и высокая температура таблеток при тяжелой аварии приводят к выходу накопленных продуктов деления и компонент топлива. Часть веществ высвобождается из материалов внутрикорпусных элементов. Выход зависит от начальной концентрации и коэффициента перехода, который в свою очередь определяется параметрами аварийной активной зоны, температурой зоны и скоростью потока газа [20, 21].

Начальная концентрация продуктов деления задается уровнем выгорания топлива и известным распределением содержания осколков деления для реактора с тепловым спектром нейтронов [22, рис. 3.14]. Из имеющихся осколков деления опасность как каталитические яды для платины и палладия представляют доноры пары электронов [12], их характеристики приведены в [23].

Для получения количественных оценок влияния отравления целесообразно выбрать теллур, имеющийся в большом количестве и характеризующийся высокими плотностью паров и вероятностью пребывания в молекулярной форме. График зависимости давления насыщения паров теллура от температуры приведен на рис. 1, он построен на основе экстраполяции данных [24]. Давление, согласно рис. 1, составляет около 0,4 Па при 120 °С, чему соответствует концентрация паров теллура в воздухе 4 ppm.

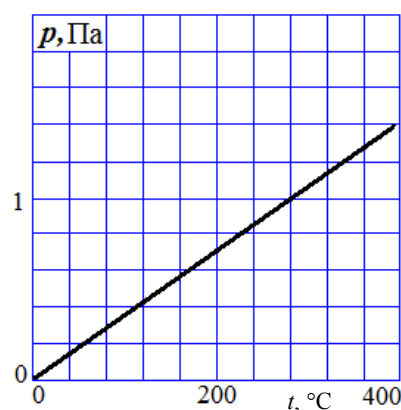


Рис. 1. График зависимости давления насыщения паров теллура от температуры

Fig. 1. Graph of the dependence of the saturation pressure of tellurium vapor on temperature

Расчет отравления молекулярными формами ядов

Расчет отравления молекулярными формами ядов в части влияния на производительность может быть проведен в общем виде без явного учета свойств отравляющей среды. Пусть яды снижают скорость химической реакции k_s в $1/A$ раз

$$k_s = A(k_s)_0, \quad (1)$$

где $(k_s)_0$ – скорость химической реакции неотравленного катализатора.

Соответственно производительность уменьшается в $\bar{G} = G(A)/G(A=1)$ раз.

Расчет ведется для условий тяжелой аварии в зоне локализации: давление 0,3 МПа, температура 125 °С, концентрация водорода 4 об. %. Для рекомбинатора FR90/1-1500 используется модель [25], для РВК-3 [26]. Изменение скорости реакции задается величиной A и определяется уравнением (1). Результаты приведены на рис. 2.

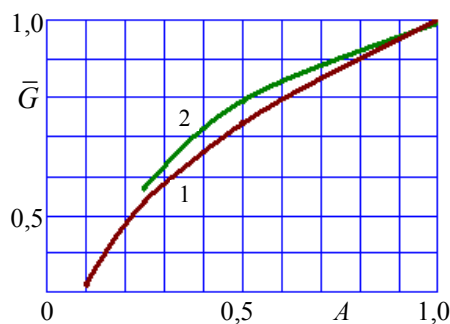


Рис. 2. Снижение производительности рекомбинатора при отравлении:
1 – FR; 2 – РВК

Fig. 2. Reduction in recombining performance due to poisoning:
1 – FR; 2 – RVK

Четырехкратное снижение скорости реакции приводит к уменьшению производительности в 1,8 раза, причем разница в проявлении эффекта для рекомбинаторов типа FR и РВК незначительна. Основной причиной снижения является рост недожога водорода. Для лабораторных условий (нормальные давления и температура) графики примерно такие же.

Вычислим концентрацию яда, соответствующую значениям коэффициента A . Относительное уменьшение скорости реакции из-за ядов определяется выражением [12]

$$\omega k_s = -dk_s/du, \quad (2)$$

где u – количество яда в граммах на грамм платины; ω – константа.

Интеграл формулы (2) $\ln(k_s) = -\omega u + C$. Поскольку изначально катализатор не отравлен, то $C = \ln((k_s)_0)$, и с учетом выражения (1)

$$\ln(A) = -\omega u. \quad (3)$$

Известны характерные величины постоянной ω : 18 – для Se; 23 – для As [12]. Для использования формулы (3) в вычислениях зададим $\omega = 20$ как типичное значение. Величина u зависит от масс активной платины в устройстве и поглощенного яда. Массы платины приводятся (должна приводиться) в техническом описании устройства. Массу поглощенного яда удобно определять, зная производительность рекомбинатора по водороду G_{H_2} , решением пропорции

$$G_A/G_{H_2} = \alpha_A C_A / \alpha_{H_2} C_{H_2} = D_A C_A / D_{H_2} C_{H_2} \approx (2/\mu_A)^{0.5} C_A / C_{H_2}. \quad (4)$$

Здесь α – коэффициент массообмена; C – массовая концентрация; μ_A – масса моля яда в граммах; индексы: A – яд; H_2 – водород.

Примеры расчета с использованием формул (2)–(4). Первый, пусть $A = 0,9$ и масса платины в рекомбинаторе 40 г, из уравнения (2) получим $u = 0,0053$, а масса теллура (молярная масса 128 г/моль), затраченного для отравления такого уровня, составит 0,21 г. Если за час в лабораторных условиях прореагировало 3,9 кг водорода при концентрации 4 об. %, то концентрация яда в атмосфере зоны локализации $\varepsilon_p = 2,7 \cdot 10^{-5}$ об. %, или 0,27 ppm. Второй, при концентрации теллура 2 ppm, водорода 4 об. % после получаса работы рекомбинатора FR90/1-1500 в аварийных условиях $A = 0,47$ и $\bar{G} = 0,75$, производительность устройства снизится на 25 %. Третий, в экспериментах [6] концентрация йода была менее 10 ppm, экспозиция порядка часа, отравление не наблюдалось. Отравление при таких условиях было бы замечено даже при $\omega \sim 1$.

По данным оператора [17], снижение скорости реакции на катализаторе вдвое под действием яда приведет к формированию концентрации водорода 1,75 об. % по сравнению с исходной, равной 1,5 об. %. Данные нашей проверки: если производительность устройства составляет 1,25 кг/ч при концентрации водорода 1,75 об. % и сниженной наполовину скорости реакции, то при полной скорости реакции и концентрации 1,5 об. % производительность составит 1,31 кг/ч, разница менее 5 %, оценка оператора второго блока АЭС «Индиана-Пойнт» подтверждается.

Расчет отравления аэрозольными формами ядов

Большая часть ядов при аварии оказывается не в молекулярной, а в аэрозольной форме [10, 27]. При выходе из раскаленной таблетки в поток, из отверстия течи в зону локализации, происходят резкое охлаждение паров, их конденсация с образованием аэрозоля. Диаметр частицы аэрозоля d можно оценить в 1 мкм, отдельные аэрозольные частицы могут объединяться в кластеры.

Аэрозоль как яд может действовать двояко. Непосредственно откладываться на каталитической поверхности как корка, затрудняющая обмен продуктами и реагентами с основным потоком. Опосредованно в горячем рекомбинаторе, с ростом температуры газа по ходу вдоль каталитических элементов, частица аэрозоля будет нагреваться и может выделять молеку-

лярные формы яда. Такой процесс наблюдался в [27]. Исследовалось превращение аэрозольной формы йодида цезия в газообразный йод, обнаружен 1,0–3,0 % выход реакции при 800 °С. Концентрация аэрозоля в газе составляла несколько грамм на метр кубический. В работе [28] среди возможных элементов, способных испариться из аэрозольной формы, назван теллур, количественные данные о процессе не приводились.

Коэффициент диффузии аэрозоля согласно формуле Эйнштейна $D_A = = RT_c/6N_A\pi d\mu = 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, где R – универсальная газовая постоянная; T_c – абсолютная температура среды; N_A – число Авогадро; μ – динамическая вязкость среды, равная $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Коэффициент диффузии водорода $D_{H_2} = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Отношение (D_A/D_{H_2}) мало, поэтому скорость поступления аэрозоля на поверхность будет низкой (4), а эффект отравления незаметным (1), (3), что наблюдалось в [6]. Следовательно, диффузия аэрозоля не может привести к значимому отравлению катализатора.

В исследовании [27] проверялось действие аэрозоля в качестве каталитического яда, производительность устройства (тип FR) оставалась в пределах 50–70 % от номинальной. Причиной наблюдаемого эффекта может быть турбулентная диффузия. Она возникает в ламинарном в целом потоке среды внутри рекомбинатора в аэродинамическом следе за плохо обтекаемыми элементами конструкции и затухает вниз по ходу течения. В рекомбинаторах типа FR плохо обтекаемый элемент один – это участок входа в кассету [25]. В рекомбинаторах типа РВК плохо обтекаемых элементов несколько: это планки рамок, удерживающих цилиндрические каталитические элементы [29].

Будем считать перенос аэрозоля на каталитическую поверхность за счет турбулентности основным механизмом формирования корки и описывать его с использованием турбулентного коэффициента переноса взамен молекулярного. Коэффициент диффузии D_A , обусловленный турбулентностью, обозначим как $(D_A)_t$. Пользуясь тройной аналогией, можно определить $(D_A)_t \sim \nu_t \sim 0,09 k_t^2 / \varepsilon_t$, $k_t = 3U^2/2$, $\varepsilon_t = 15\nu(U/\delta)^2$, где k_t – кинетическая энергия турбулентности; ε_t – скорость диссипации кинетической энергии; U – масштаб скорости; δ – линейный масштаб; ν_t – коэффициент турбулентной вязкости [30]; вязкость газа $\nu = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ (воздух).

Каталитический элемент 2 имеет цилиндрическую форму и следующие размеры: диаметр 5 мм, длина 65 мм (рис. 3). Каталитический элемент 2 в сборе с рамкой 1 образует сложную аэродинамическую структуру. В качестве элемента структуры выделим плохо обтекаемую часть 3, включающую диск диаметром 13 мм (часть планки рамки) и участок цилиндрической поверхности каталитического элемента 2. Поток взаимодействует с плохо обтекаемой частью 3, образуя зону отрыва и турбулентности 4, затем движется вдоль образующей элемента 2 до его конца. Более мелкие структуры не рассматриваются. Считаем, что второй ряд рамок [29] по ходу потока подобен первому в части характера обтекания. Уступ между диском и цилиндром имеет высоту 4 мм и определяет ширину зоны отрыва, в которой поток

имеет турбулентный характер [31]. Принимаем $\delta = 4$ мм. Скорость при входе в неотравленный рекомбинатор РВК при 0,3 МПа, температуре 125 °С, концентрации водорода 4 об. % составляет по расчету 0,38 м/с, производительность 3,5 кг/ч. Принимаем $U = 0,38$ м/с, тогда $(D_A)_t \sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ м²/с. Подстановка значений в выражение (4) определяет $G_A = 1,2$ г/мин при выбранной концентрации аэрозоля в атмосфере зоны локализации 10 мг/м³. Общая площадь поверхности каталитических элементов составляет 8,4 м². Для покрытия плотной коркой толщиной 3 мкм 1 м² поверхности катализатора потребуется 6 г аэрозоля плотностью 2 г/см³, что займет 40 мин времени.

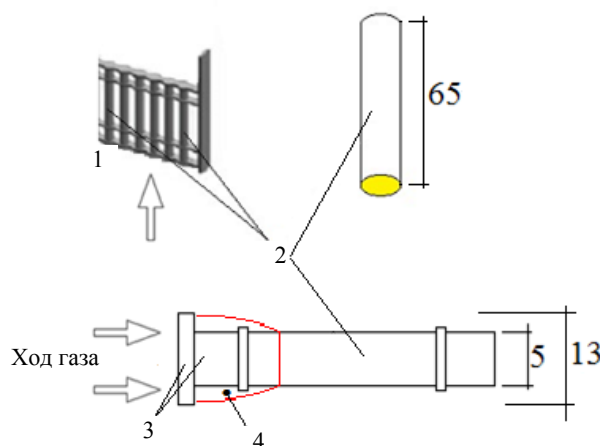


Рис. 3. Схема обтекания каталитического элемента рекомбинатора РВК:

1 – рамка; 2 – каталитический элемент; 3 – плохо обтекаемая часть;
4 – зона отрыва и турбулентности

Fig. 3. Flow diagram of the catalytic element of the RVK recombiner:

1 – frame; 2 – catalytic element; 3 – poorly streamlined part; 4 – separation and turbulent zone

Оценим отравление количественно. Длина турбулентной зоны составляет обычно 5δ , так что отравленной полностью окажется $20/65 = 0,31$, или 31 % площади катализатора. Расчет производительности РВК-3 с учетом потери установленной части площади каталитической поверхности для условий в зоне локализации (давление 0,3 МПа, температура 125 °С, концентрация водорода 4 об. %) дает следующие результаты: недожог увеличится с 0,41 до 0,54, а производительность снизится с 3,54 до 2,61 кг/ч, или до 74 %. Потеря производительности не равна в точности потере площади каталитической поверхности, поскольку оставшийся катализатор работает при относительно более высоком уровне концентрации водорода. Для разумной удобной консервативной оценки снижения производительности можно принять ее пропорциональной потере площади.

Для рекомбинатора FR при натекании газа параллельно пластинам $\delta = 3$ мм (толщина пластины) потеря площади составит $15/140 = 0,11$ части, при натекании газа под углом к пластинам $\delta = 10$ мм (ширина щели между пластинами) потеря до $50/140 = 0,36$. Натекание под углом возника-

ет при наличии горизонтальной составляющей скорости у входа в кассету с каталитическими пластинами. Обычно горизонтальная составляющая отсутствует, поэтому в качестве характерной величины потери производительности следует использовать величину 0,11.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ влияния каталитических ядов на эффективность работы рекомбинаторов водорода системы удаления последнего локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР. Количества выделившихся ядов при тяжелой аварии ВВЭР достаточно для снижения производительности рекомбинаторов. Яд вызывает постепенное снижение производительности рекомбинаторов с ростом количества прореагировавшего водорода. Механизмы действия ядов в форме веществ и в форме аэрозолей различны.

2. Для платинового катализатора опасны вещества-доноры пары электронов, например теллур. Яды в форме веществ снижают скорость химической реакции рекомбинации водорода на поверхности катализатора. Уровень снижения оценен расчетами для рекомбинаторов FR и RBK, предложены график снижения производительности в зависимости от скорости реакции и формула, устанавливающая связь между дозой поглощенного яда и уменьшением скорости реакции. Увеличение массы активной платины в каталитических элементах ослабляет действие молекулярного яда.

3. Действие ядов в аэрозольной форме может проявляться в аэродинамическом следе за плохо обтекаемыми элементами конструкции. Аэрозоль изолирует поверхность катализатора коркой, препятствующей транспорту реагентов и продуктов реакции. В рекомбинаторах типа FR плохо обтекаемый элемент один – это участок входа в кассету, доля поверхности под коркой по расчету 0,11. В рекомбинаторах типа RBK плохо обтекаемых элементов несколько: это планки рамок, удерживающих цилиндрические каталитические элементы, доля поверхности под коркой 0,31. В качестве консервативной оценки снижения производительности рекомбинатора можно принять ее пропорциональной потере площади каталитической поверхности под коркой.

4. Эффект отравления следует учитывать при выборе количества рекомбинаторов системы удаления водорода локализующей системы безопасности энергоблока АЭС с ВВЭР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект АЭС-2006. Основные концептуальные решения на примере Ленинградской АЭС-2. ОАО «СПбАЭП». СПб.: Ин-т «Атомэнергопроект», 2011. 40 с.
2. Велькер, М. Инновационные технологии для обеспечения безопасности АЭС как следствие аварии на АЭС Фукусима / М. Велькер // 7-я Международная выставка и конференция Атомэкспо-Беларусь 2015: официальный каталог, Минск, 22–24 апреля 2015 г. / РУП НВЦ «БелЭкспо». Минск, 2015. С. 59.
3. AREVA Passive Autocatalytic Recombiner / Brochure: AREVA GmbH Paul-Gossen-Straße 100 91052 Erlangen. Germany. 2013. G-008-V3-13-ENGPB.
4. Рубинштейн, А. М. Применение платины и палладия в качестве катализатора / А. М. Рубинштейн // Изв. Ин-та изучения платины. 1943. Вып. 19. С. 61–102.

5. Morfin, F. Catalytic Combustion of Hydrogen for Mitigating Hydrogen Risk in Case of a Severe Accident in a Nuclear Power Plant: Study of Catalysts Poisoning in a Representative Atmosphere / F. Morfin, J.-C. Sabroux, A. Renouprez // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2004. Vol. 47, No 1. P. 47–58.
6. Understanding of the Operation Behaviour of a Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for Hydrogen Mitigation in Realistic Containment Conditions During a Severe Light Water Nuclear Reactor (LWR) accident / F. Payota [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. July 2012. Vol. 248. P. 178–196.
7. Пассивный каталитический рекомбинатор водорода РВК-3. Технические условия: РЭТ-131.00.000 ТУ. М.: Рус. энерг. технологии, 2011. 25 с.
8. Техническое задание на закупку системы аварийного удаления водорода из ГО РУ для энергоблоков № 3 и № 4 Нововоронежской АЭС. Утв. 04.07.2013. Нововоронеж: НВАЭС, 2013. 10 с.
9. Национальный отчет о результатах проведения «стресс-тестов» / Государственная инспекция ядерного регулирования Украины. Киев: ГИЯРУ, 2011. 136 с.
10. IAEA safety related publications. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661. Vienna: IAEA, 2011. 174 p.
11. Корсак, Е. П. Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС / Е. П. Корсак, В. А. Романко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 428–441. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441>.
12. Боресков, Г. К. Катализ в производстве серной кислоты / Г. К. Боресков. М.–Л.: ГНТИ ХЛ, 1954. 348 с.
13. Курский, А. С. Радиолит теплоносителя и методы обеспечения водородной взрывозащиты корпусного кипящего реактора ВК-50 / А. С. Курский // *Атомная энергия*. 2013. Т. 115, вып. 5. С. 250–255.
14. Gupta, S. THAI Experimental Research on Hydrogen Risk and Source Term Related Safety Systems / S. Gupta, M. Freitag, G. Poss // *Front. Energy*. 2021. Vol. 15 (4). P. 887–915.
15. Braun, M. AMHYCO Engineering Correlation to Describe the Conversion of Flammable Gases in Framatome Passive Autocatalytic Recombiners / M. Braun, E.-A. Reinecke // *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 442. 114206.
16. Moffett, R. A Canadian Perspective on Passive Autocatalytic Recombiners / R. Moffett // *Nuclear Engineering International*. 2012. No 8. P. 2.
17. Reply to Request for Additional Information Passive Autocatalytic Recombiners, Indian Point Unit No 2, May 2, 1997. Indian Point Station, 1997. Docket-No. P. 50–247.
18. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И. А. Кириллов [и др.] // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2017. № 2 (84). С. 1–12.
19. Трехмерный расчет горения водородосодержащих паровоздушных смесей в рамках обоснования безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Безлепкин и [др.] // Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-007.pdf>. Дата доступа: 18.09.2019.
20. *Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Conditions*. State-of-the-art Report. NEA No. 6846. OECD, 2009. 369 p.
21. Витоль, С. А. Выход радиоактивных материалов из расплава активной зоны при тяжелой аварии АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03 / С. А. Витоль; ФГУП НИТИ Сосновый Бор, 2007. 247 с.
22. Климов, А. Н. Ядерная физика и ядерные реакторы / А. Н. Климов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
23. Воробьев, В. В. Расчет влияния отравления на производительность пассивного каталитического рекомбинатора водорода. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-137.pdf>.
24. Свойства вещества: теллур. Режим доступа: <http://chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=262>. Дата доступа: 18.08.2017.
25. Сорокин, В. В. Расчет характеристик пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006 / В. В. Сорокин // *Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн.* 2020. № 4. С. 496–505.
26. Сорокин, В. В. Эффективность рекомбинаторов водорода РВК в условиях тяжелой аварии на энергоблоке проекта АЭС-2006 / В. В. Сорокин // *Энергетик*. 2025. № 3. С. 20–22.

27. State-of-the-Art Reports of Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations. State-of-the-art report on nuclear aerosols: NEA/CSNI/R(2009)5. Paris: CSNI, 2009. 388 p.
28. State-of-the-Art Reports of Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations. Containment Code Validation Matrix: NEA/CSNI/R(2014)3. Paris: CSNI, 2014. 614 p.
29. Сорокин, В. В. Точность расчетных зависимостей для определения производительности пассивных рекомбинаторов водорода РВК-3 и РВК-4 // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 3 (117). С. 81–89. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.006.
30. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. М.: Мир, 1988. 544 с.
31. Чжен, П. Отрывные течения: в 3 т. Т. 1 / П. Чжен. М.: Мир, 1972. 299 с.

Поступила 14.10.2025 Подписана в печать 22.12.2025 Опубликовано онлайн 30.01.2026

REFERENCES

1. JSC Saint Petersburg AtomEnergoProekt (2011). *Nuclear Power Plant-2006 Project. Main Conceptual Solutions Using the Example of Leningrad NPP-2*. Saint Petersburg, Publishing House of Institute "Atomenergoproekt". 40 (in Russian).
2. Welker M. (2015) Innovative Technologies for Ensuring Nuclear Power Plant Safety as a Consequence of the Fukushima Nuclear Power Plant accident. *7th International Exhibition and Conference Atomexpo-Belarus 2015: Official Catalog, Minsk, April 22–24, 2015*. Minsk, 2015, 59 (in Russian).
3. *AREVA Passive Autocatalytic Recombiner G-008-V3-13-ENGPB*. Erlangen, Germany, 2013.
4. Rubinshtein A. M. (1943) Use of Platinum and Palladium as a Catalyst. *Izvestiya sektora platiny i drugikh blagorodnykh metallov. Vyp. 19* [News of the Platinum and Other Precious Metals Sector. Iss. 19]. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 61–102 (in Russian).
5. Morfin F., Sabroux J.-C., Renouprez A. (2004) Catalytic Combustion of Hydrogen for Mitigating Hydrogen Risk in case of a Severe Accident in a Nuclear Power Plant: Study of Catalysts Poisoning in a Representative Atmosphere. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47 (1), 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2003.07.001>.
6. Payot F., Reinecke E.-A., Morfin F., Sabroux J.-C., Meynet N., Bentaib A., March P., Zeyen R. (2012) Understanding of the Operation Behaviour of a Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for Hydrogen Mitigation in Realistic Containment Conditions During a Severe Light Water Nuclear Reactor (LWR) accident. *Nuclear Engineering and Design*, 248, 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.03.042>.
7. Passive Catalytic Hydrogen Recombiner RVK-3. Specifications: RET-131.00.000 TU. Moscow, Publishinh House "Russkie Energeticheskie Tekhnologii", 2011. 25 (in Russian).
8. *Technical Specifications for the Procurement of an Emergency Hydrogen Removal System from the Containment Volume of the Reactor Section for Power Units No 3 and No 4 of the Novovoronezh Nuclear Power Plant*. Approved on 04.07.2013. Novovoronezh, Publishing House of Novovoronezh Nuclear Power Plant, 2013. 10 (in Russian).
9. State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine (2011) *National Stress Test Results Report*. Kiev, State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine. 136 (in Russian).
10. IAEA Safety Related Publications. *Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1661*. Vienna, IAEA, 2011. 174.
11. Korsak K. P., Romanko V. A. (2025) Simulation Modeling and Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plant Risk Management. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (5), 428–441. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441> (in Russian).
12. Boreskov G. K. (1954) *Catalysis in the Production of Sulfuric Acid*. Moscow-Leningrad, State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature. 348 (in Russian).
13. Kurskii A. S. (2014) Coolant Radiolysis and Hydrogen Explosion Protection for the VK-50 Boiling-Water Reactor Vessel. *Atomic Energy*, 115, 300–306. <https://doi.org/10.1007/s10512-014-9787-2>.
14. Gupta S., Freitag M., Poss G. (2021) THAI Experimental Research on Hydrogen Risk and Source Term Related Safety Systems. *Frontiers in Energy*, 15 (4), 887–915. <https://doi.org/10.1007/s11708-021-0789-1>.
15. Braun M., Reinecke E.-A. (2025) AMHYCO Engineering Correlation to Describe the Conversion of Flammable Gases in Framatome Passive Autocatalytic Recombiners. *Nuclear Engineering and Design*, 442, 114206. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114206>.

16. Moffett R. (2012) A Canadian Perspective on Passive Autocatalytic Recombiners. *Nuclear Engineering International*, 57 (8), 15–17. Available at: <https://www.neimagazine.com/advanced-reactorsfusion/a-canadian-perspective-on-passive-autocatalytic-recombiners/?cf-view>.
17. Reply to Request for Additional Information Passive Autocatalytic Recombiners, Indian Point Unit No 2, May 2, 1997. Indian Point Station, 1997. Docket-No. P. 50–247.
18. Kirillov I. A., Kharitonova N. L., Sharafutdinov R. B., Khrennikov N. N. (2017) Ensuring Hydrogen Safety at Nuclear Power Plants with Water-Cooled Reactors. The Current State of the Problem. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost* [Nuclear and Radiation Safety], (2), 26–37.
19. Bezlepkina V. V. [et al.] (2017) Three-Dimensional Calculation of Combustion of Hydrogen-Containing Steam-Air Mixtures as Part of the Safety Justification for Nuclear Power Plants with Water-Cooled Water Reactors. *Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with Water-Moderated Water-Cooled Reactors: International Scientific and Technical Conference, Podolsk, Joint-Stock Company (JSC), Experimental Design Bureau "Gidropress", May 16–19, 2017*. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-007.pdf>. (accessed 18 September 2019) (in Russian).
20. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development (2009) *Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Conditions. State-of-the-Art Report. NEA No. 6846*. Available at: <https://gifsymposium2018.gen-4.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/csni-r2009-15.pdf>.
21. Vitol S. A. (2007) *Release of Radioactive Materials from the Core Melt During a Severe Nuclear Power Plant Accident* [Dissertation]. Saint Petersburg (in Russian).
22. Klimov A. N. (1985) *Nuclear Physics and Nuclear Reactors*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
23. Vorobyov V. V. (2017) Calculation of the Influence of Poisoning on the Performance of a Passive Catalytic Hydrogen Recombiner. *Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with Water-Moderated Water-Cooled Reactors: International Scientific and Technical Conference, Podolsk, Joint-Stock Company (JSC), Experimental Design Bureau "Gidropress", May 16–19, 2017*. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/documents/mntk2017-137.pdf> (in Russian).
24. Properties of the Substance: Tellurium. *Database of Physical and Chemical Properties and Syntheses of Substances*. Available at: <http://chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=262> (accessed 18 August 2017) (in Russian).
25. Sorokin V. V. (2020) Passive Autocatalytic Recombiner Characteristics Calculation During Severe Accident on AES-2006 NPP. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 65 (4), 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-496-505> (in Russian).
26. Sorokin V. V. (2025) Efficiency of RVK Hydrogen Recombiners under Severe Accident Conditions at the Power Unit of the 2006 Nuclear Power Plant. *Energetik*, (3), 20–22 (in Russian).
27. Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations (2009). *State-of-the-Art Report on Nuclear Aerosols: NEA/CSNI/R(2009)5*. Paris, CSNI. Available at: https://oecd-neo.org/jcms/pl_18750/state-of-the-art-report-soar-on-nuclear-aerosols.
28. Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations (2014). *Containment Code Validation Matrix: NEA/CSNI/R(2014)3*. Paris, CSNI. Available at: https://oecd-neo.org/jcms/pl_19413/containment-code-validation-matrix.
29. Sorokin V. V. (2025) Accuracy of Calculated Dependencies for Determining the Performance of Passive Hydrogen Recombiners RVK-3 and RVK-4. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost* [Nuclear and Radiation Safety], (3), 81–89. <https://doi.org/10.26277/secnr.2025.117.3.006> (in Russian).
30. Shih T.-M. (1984) *Numerical Heat Transfer*. Washington: Hemisphere Pub. Corp. 563.
31. Chang P. (1970) *Separated Flow*. Pergamon Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-05541-7>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-77-94>

УДК 697.343 (004.896)

Нейронная сеть прогнозирования теплового потребления здания

М. В. Колосов¹⁾, А. Ю. Липовка¹⁾, Ю. Л. Липовка¹⁾

¹⁾Сибирский федеральный университет (Красноярск, Российская Федерация)

Реферат. Прогнозирование спроса на тепловую энергию необходимо для достижения оптимального управления энергопотреблением здания. Целью данной статьи является выявление важнейших факторов, влияющих на точность прогнозирования теплопотребления зданий с применением нейронных сетей, что соответствует национальной стратегии развития искусственного интеллекта РФ. В статье исследуется зависимость точности моделирования от различных комбинаций параметров окружающей среды, а также от применения разных функций активации нейронных сетей, широко используемых в практике создания систем искусственного интеллекта. Продемонстрировано, что модели машинного обучения, основанные на большом количестве данных о тепловом потреблении, имеют большие возможности в прогнозировании реальных моделей и тенденций потребления, а значение средней абсолютной процентной ошибки лучшей модели прогнозирования сопоставимо с величиной максимального предела допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии измерительным каналом теплосчетчика. На основе данных, полученных с помощью разработанной системы дистанционного мониторинга индивидуальных тепловых пунктов зданий, продемонстрировано сравнение действительных значений теплового потребления и величин теплового потребления, полученных с использованием модели прогнозирования. Экономия энергии, теплоносителя и прочего на объекте не может быть измерена напрямую, поскольку она представляет собой отсутствие потребления. Поэтому универсальный подход с использованием искусственного интеллекта для технически обоснованного и экономически целесообразного метода прогнозирования результатов применения энергосберегающих решений для сравнения измеренного энергопотребления до и после внедрения энергоэффективного мероприятия может позволить повысить эффективность принятия решений в сфере сбережения энергетических ресурсов.

Ключевые слова: энергоэффективность здания, теплоснабжение, отопление зданий, нейросеть, искусственный интеллект, индивидуальный тепловой пункт, компьютерное моделирование, мониторинг теплопотребления

Для цитирования: Колосов, М. В. Нейронная сеть прогнозирования теплового потребления здания / М. В. Колосов, А. Ю. Липовка, Ю. Л. Липовка // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 1. С. 77–94. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-77-94>

Neural Network for Predicting Building Heat Consumption

M. V. Kolosov¹⁾, A. Yu. Lipovka¹⁾, Yu. L. Lipovka¹⁾

¹⁾Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russian Federation)

Abstract. Heat demand forecasting is necessary to achieve optimal management of building energy consumption. The purpose of this article is to identify the most important factors influencing

Адрес для переписки

Колосов Михаил Викторович
Сибирский федеральный университет
просп. Свободный, 79/10,
660041, Красноярск, Российская Федерация
Тел.: +375 0000-0003-4884-4889
MKolosov@sfu-kras.ru

Address for correspondence

Kolosov Mikhail V.
Siberian Federal University
79/10, Svobodny Ave.,
660041, Krasnoyarsk, Russian Federation
Tel.: +375 0000-0003-4884-4889
MKolosov@sfu-kras.ru

the accuracy of forecasting heat consumption of buildings using neural networks, which is in line with the national strategy for the development of artificial intelligence of the Russian Federation. The article studies the dependence of modeling accuracy on various combinations of environmental parameters, as well as on the application of different activation functions of neural networks, widely used in the practice of creating artificial intelligence systems. It is demonstrated that machine learning models based on a large number of data on thermal consumption have great possibilities in predicting real patterns and trends of consumption, and the value of the average absolute percentage error of the best prediction model is comparable to the value of the maximum limit of the tolerable relative error of thermal energy measurements by the measuring channel of the heat meter. On the basis of data obtained using the developed system of remote monitoring of individual heating points of buildings, a comparison of actual values of heat consumption and values of heat consumption obtained using the prediction model was demonstrated. Savings of energy, heat carrier and other things at the object cannot be measured directly, because the savings represent the absence of consumption, so a universal approach using artificial intelligence for a technically sound and economically feasible method of predicting the results of the application of energy-saving solutions to compare the measured energy consumption before and after the implementation of energy-efficient measures may allow to improve the efficiency of decision-making in the field of saving energy resources

Keywords: building energy efficiency, heat supply, building heating, neural network, artificial intelligence, individual heat supply unit, computer modeling, heat consumption monitoring

For citation: Kolosov M. V., Lipovka A. Yu., Lipovka Yu. L. (2026) Neural Network for Predicting Building Heat Consumption. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 77–94. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-77-94> (in Russian)

Введение

В 2019 г. принята Национальная стратегия развития искусственного интеллекта, в которой определяются цели и основные задачи искусственного интеллекта в Российской Федерации, а также меры, направленные на его использование в целях обеспечения национальных интересов и реализации стратегических приоритетов, в том числе в области научно-технологического развития. Интерес к исследованиям на тему искусственного интеллекта привел к появлению огромного количества их вариаций, включая искусственный интеллект, построенный на нейросетевых алгоритмах. В то же время количество публикаций по тематике применения нейронных сетей в системе мониторинга и управления энергоэффективностью отопляемых зданий весьма ограничено. Одной из задач управления энергоэффективностью является разработка инструментария для оценки эффективности внедрения энергосберегающих решений с использованием моделей прогнозирования энергопотребления.

Обзор особенностей построения моделей прогнозирования теплового спроса зданий представлен в [1]. Модели машинного обучения, основанные на большом количестве данных о нагрузке, продемонстрировали свои большие возможности в прогнозировании реальных моделей и тенденций потребления. Показано, что тепловые нагрузки, температура наружного воздуха и часовая индекс имеют наибольшее влияние и наряду с дополнительным использованием данных по скорости ветра и индексу дня, что улучшает среднеквадратичное отклонение, их следует в первую очередь

учитывать в моделях прогнозирования теплового потребления. И, напротив, включение всех доступных параметров не приводит к достижению более высокой точности прогноза. Представленная в [2] методология сопоставления точности методов, используемых для количественной оценки неопределенности в определении общей экономии энергии, может быть использована для оценки неопределенности в прогнозах экономии, возникающей из-за ошибки модели. Показано, что широко используемые стандартные методы, как правило, недооценивают неопределенность, причем эта тенденция сильнее для часовых моделей, чем для дневных из-за более сильной автокорреляции в остатках модели в часовом масштабе времени. В работе [3] сопоставлены два основных подхода к рассмотрению неопределенностей прогнозов управления моделями зданий. Показана существенная разница в ошибках прогноза для зданий с разными характеристиками ограждающих конструкций: для плохо изолированных зданий и для зданий с высокой степенью изоляции.

Точное краткосрочное прогнозирование спроса на тепловую энергию необходимо для достижения оптимального управления энергопотреблением здания, экономии затрат, экологической устойчивости и ответственного потребления энергии. Кроме того, краткосрочное прогнозирование тепловой энергии способствует достижению нулевого энергопотребления зданий в холодном климате. В [4] оценивались шесть распространенных алгоритмов глубокого обучения для прогнозирования энергетической нагрузки, включая одиночные и гибридные модели. Надежное и точное прогнозирование нагрузки на отопление может предоставить исчерпывающую информацию для мониторинга и управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в зданиях, что позволяет эффективно снизить неопределенность в отношении потребности в энергии. В [5] продемонстрирован потенциал для прогнозирования нагрузки на отопление с учетом комплексного выбора физических переменных, влияющих на почасовые динамические изменения сезонной нагрузки здания. Результаты [6] подчеркивают важность детального анализа предварительной обработки данных в моделях обучения для точного прогнозирования спроса на потребление энергии в реальных условиях. Модели машинного обучения могут улучшить производительность систем теплоснабжения, точно прогнозируя потребление энергии зданием и использование нагрузки [7]. В [8] представлен прогноз потребления тепловой энергии на основе реальных данных интеллектуального учета теплоты с учетом возможностей нейронных сетей. Точное прогнозирование энергопотребления здания имеет решающее значение для рационального проектирования энергосистем зданий [9]. В [10] обсуждаются технические решения, способствующие интеграции электрических и тепловых сетей, а в [11] показано наличие потенциала экономии энергии за счет оптимизации параметров теплоснабляющих систем для различных географических регионов.

Известно, что принцип работы нейросети – механизма обработки информации сводится к тому, что активации в одном слое приводят к актива-

циям в следующем слое, и, наконец, какой-то шаблон активаций в финальном слое – это выбор нейросети. Вместе с тем алгоритм обучения нейронных сетей недостаточно освещен в работах.

Целью статьи является выявление важнейших факторов, влияющих на точность прогнозирования теплоснабжения зданий с применением нейронных сетей и активного дистанционного компьютерного мониторинга, оценивающего и, возможно, в будущем корректирующего механизма управления энергоэффективностью зданий.

Основная часть

Существует множество потенциальных интеллектуальных задач, которые разбиваются на слои абстракции (пример – разбор речи, распознавание рукописей), но все они сводятся к получению сырого исходного материала и последующему выделению отдельных параметров, которые комбинируются для образования абстрактных мыслей и т. д. В нашем случае в качестве исходного материала дистанционно на сервер поступают значения тепловых (температур в характерных точках индивидуального теплового пункта здания) и гидравлических (давлений, расходов) параметров, которые впоследствии преобразуются в управленческие действия регулирующих клапанов.

Рассмотрим основные функции активации, широко применяемые в практике создания систем искусственного интеллекта. Активация в нейронах – число от 0 до 1, выражающее, насколько система уверена, что входная информация содержит соответствующую информацию об оптимизируемом параметре энергоэффективности здания.

Переход активаций a от одного слоя, допустим, исходного – входящего $a^{(0)}$ к следующему $a^{(1)}$ представляется в виде выражения

$$a^{(1)} = \sigma(Wa^{(0)} + b),$$

где W – матрица объединенных весов, каждая строка которой описывает соединения между нейронами одного слоя с конкретным нейроном следующего слоя; a – вектор-столбец, объединяющий все активации слоя; b – вектор-столбец сдвигов (смещений).

В качестве сжимающей функции σ может быть использована сигмоидная функция сжатия, $\sigma(x) = 1 / (1 + e^{-x})$, или функция выпрямленного линейного модуля $ReLU(a) = \max(0, a)$. Значения весов W и смещений b необходимо подобрать.

Обучающаяся нейронная сеть, которая по сути является функцией, в нашем случае на входе принимает 11 значений от теплорегистратора (температуры и расходы воды) и 13 значений погодных факторов (температура воздуха, скорость ветра, облачность и т. д.), блочно рандомизированных и взаимно синхронизированных по времени.

Разница между фактическим выходом и выходом нейронной сети оценивается с помощью функции стоимости нейронной сети C , которая равна сумме квадратов различий между промежуточной выходной активацией и желаемым значением, а градиент функции ∇C указывает направление наибольшего спуска, – в каком направлении следует сделать шаг, чтобы уменьшить C быстрее всего, а длина этого вектора-градиента позволяет выявить наиболее крутой склон. То есть алгоритм минимизации функции C состоит в том, чтобы вычислить направление ∇C , затем многократно повторить небольшие шаги вниз. Алгоритм эффективного расчета ∇C , являющийся основой обучения нейронной сети, называется обратным распространением ошибки. Этот процесс многократного подталкивания входных данных функции на величину, кратную отрицательному ∇C , есть градиентный спуск.

Учитывая, что в задаче управления энергопотреблением некоторые входные параметры теплосчетчика (к примеру, температура воды в подающем трубопроводе) и сами являются функциями климатологических параметров, сложность вычисления функции стоимости кратно возрастает.

Основной алгоритм обучения нашей нейронной сети – это исчисление обратного распространения ошибки. Необходимо оценить степень чувствительности функции стоимости C одного обучающего примера сети с нейроном последнего слоя с индексом L , равной квадрату разности последней активации $a^{(L)}$ и конкретного значения функции y , $C = (a^{(L)} - y)^2$, где $a^{(L)} = w^{(L)} a^{(L-1)} + b^{(L)}$ от корректировки переменных: веса $w^{(L)}$ и смещения $b^{(L)}$, т. е. как они приведут к наиболее эффективному уменьшению функции затрат. Преобразуем $a^{(L)}$ посредством специальной нелинейной функции σ – сигмовидной, или ReLU, тогда после присвоения специального имени $z^{(L)}$ взвешенной сумме $w^{(L)} a^{(L-1)} + b^{(L)}$ получим $a^{(L)} = \sigma(w^{(L)} \cdot a^{(L-1)} + b^{(L)}) = \sigma(z^{(L)})$.

Небольшие изменения веса, влияющие на стоимость, для конкретного обучающего примера k :

$$\frac{\partial C_k}{\partial w^{(L)}} = \frac{\partial z^{(L)}}{\partial w^{(L)}} \frac{\partial a^{(L)}}{\partial z^{(L)}} \frac{\partial C_k}{\partial a^{(L)}};$$

$$\frac{\partial C_0}{\partial a^{(L)}} = 2(a^{(L)} - y); \quad \frac{\partial a^{(L)}}{\partial z^{(L)}} = \sigma(z^{(L)}); \quad \frac{\partial z^{(L)}}{\partial w^{(L)}} = a^{(L-1)}.$$

Функция полной стоимости включает в себя усреднение всех затрат по множеству различных обучающих примеров k , следовательно, и ее производную необходимо усреднить по всем обучающим примерам n

$$\frac{\partial C}{\partial w^{(L)}} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\partial C_k}{\partial w^{(L)}}.$$

Компонент вектора градиента состоит из частных производных функции стоимости по всем весам и смещениям

$$\nabla C = \begin{bmatrix} \frac{\partial C}{\partial w^{(1)}} \\ \frac{\partial C}{\partial b^{(1)}} \\ \vdots \\ \frac{\partial C}{\partial w^{(L)}} \\ \frac{\partial C}{\partial b^{(L)}} \end{bmatrix}.$$

Исходные данные для моделирования искусственного интеллекта получены в результате пятилетнего мониторинга теплогидравлических режимов тепловых пунктов более чем 250 зданий [12]. Для демонстрации работы данного метода рассмотрена модель теплопотребления одного из этих зданий. В качестве данных для прогнозирования приняты данные отопительной системы здания г. Красноярска с 13.12.2017 по 25.02.2024.

Следующим шагом является выбор подмножества из исходного, чтобы только наиболее важные входные признаки были включены при разработке модели. В избранном подмножестве приняты пять параметров: среднесуточная температура наружного воздуха, °С, относительная влажность, %, скорость ветра, км/ч, облачность, %, и солнечная энергия, МДж/(м²·сут.). Рассмотрим, как полученные данные связаны друг с другом. Для этого воспользуемся математической мерой корреляции. Математической мерой корреляции двух случайных величин служит коэффициент корреляции

$$r_{xy} = \frac{\sum((x - \bar{x})(y - \bar{y}))}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}.$$

Полученные значения коэффициентов корреляции параметров модели прогнозирования энергопотребления представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что наибольшее абсолютное значение коэффициентов корреляции наблюдается между тепловым потреблением здания, среднесуточной температурой наружного воздуха, а также значением солнечной энергии.

Диаграмма рассеяния, представленная на рис. 2, в удобном виде показывает распределение элементов множества в плоскости и может продемонстрировать зависимость выбранных параметров друг от друга. Особое

внимание следует уделить парам с наибольшим значением коэффициента корреляции.

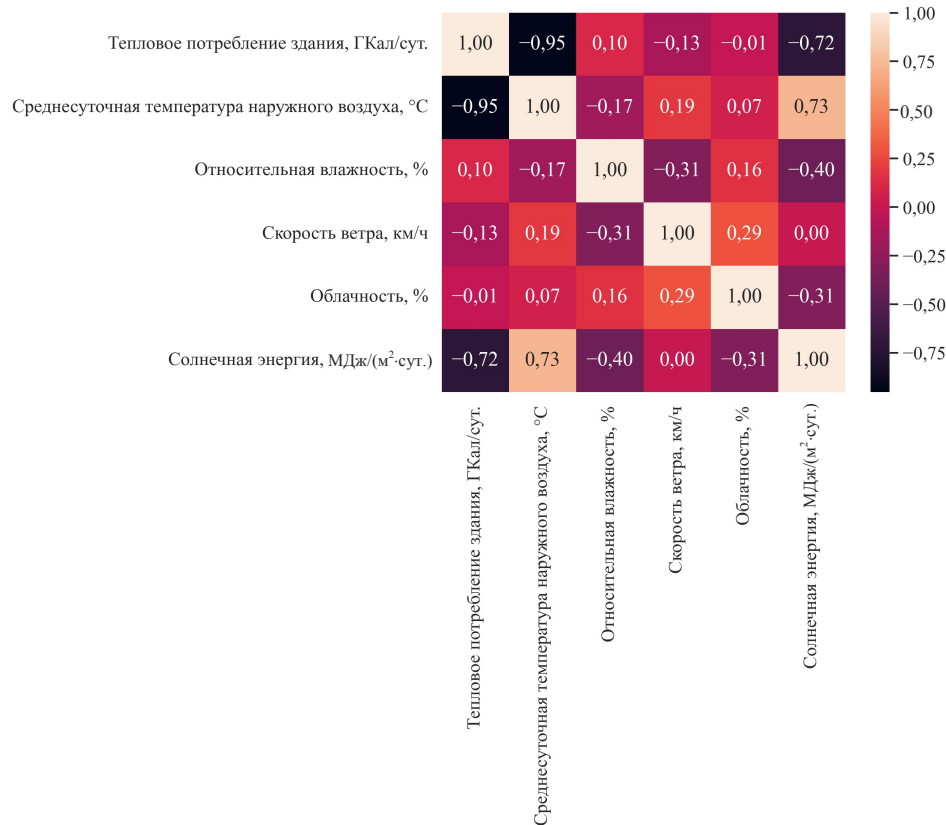


Рис. 1. Значения коэффициентов корреляции параметров модели прогнозирования энергопотребления

Fig. 1. Correlation coefficient values for the energy consumption forecasting model parameters

После того как были определены исходные данные, можем перейти к построению нейронной сети. Нейронная сеть для прогнозирования теплового потребления здания была построена с тремя внутренними слоями с количеством нейронов, равным 100 для каждого слоя, с применением функции активации ReLU для каждого слоя. В качестве входных параметров использовались различные комбинации исходных данных. На рис. 3 представлен пример схемы построения нейронной сети прогнозирования теплового потребления здания с тремя входными параметрами.

Для определения лучшей комбинации входных параметров было создано 15 нейронных сетей с различными комбинациями входных параметров, для которых рассчитаны несколько ключевых показателей оценки их эффективности.

Показатели оценки эффективности необходимы для количественного отражения того, насколько точно разработанные модели могут прогнозировать потребленную тепловую энергию.

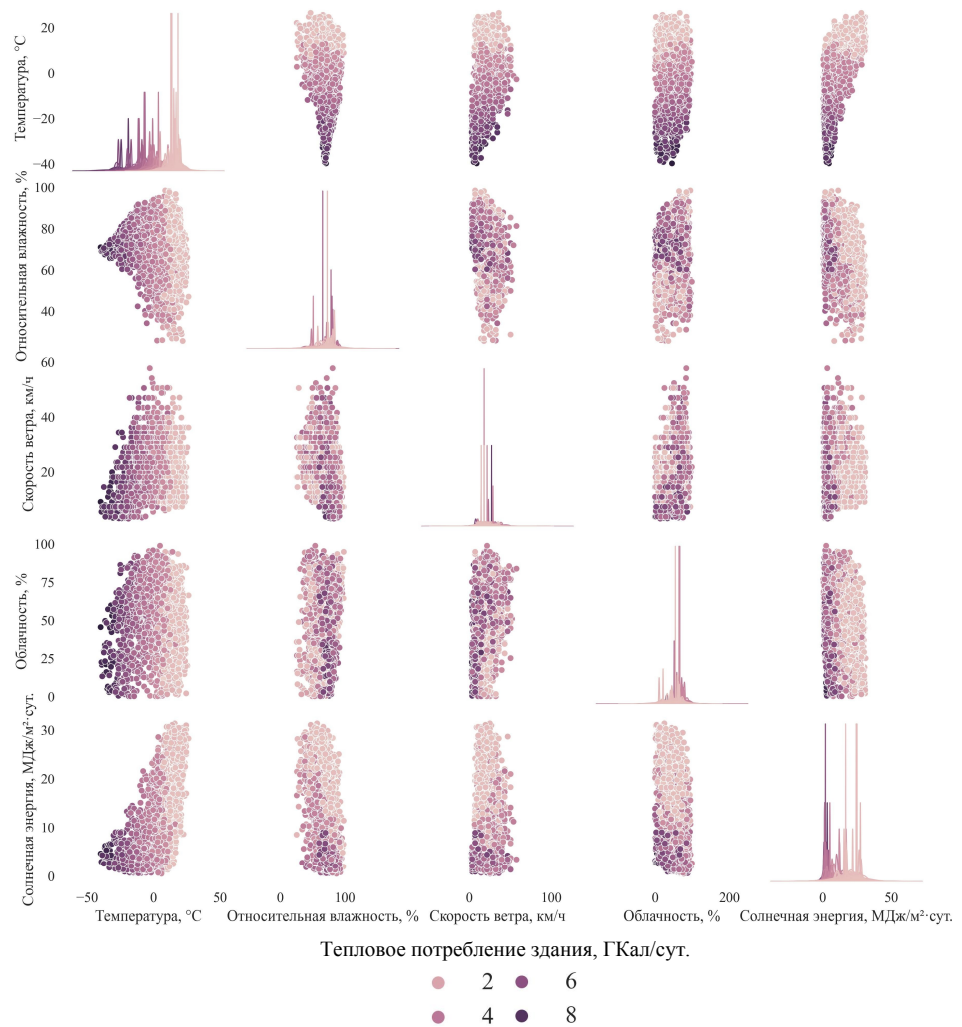


Рис. 2. Диаграмма рассеяния параметров модели прогнозирования энергопотребления
Fig. 2. Scatter diagram of the parameters of the energy consumption forecasting model

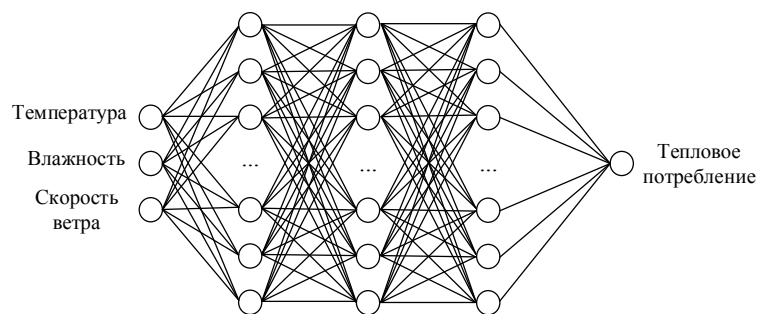


Рис. 3. Пример схемы построения нейронной сети прогнозирования теплового потребления здания
Fig. 3. Example of a neural network for predicting heat consumption of a building

Поскольку трудно найти один показатель, который бы доминировал над другими по всем параметрам, обычно в типичных задачах статистической регрессии используются несколько показателей для получения более полного представления об эффективности прогноза. Для оценки нейронной сети использованы наиболее часто применяемые показатели оценки эффективности: корень из среднеквадратичной ошибки (*RMSE*), средняя абсолютная процентная ошибка (*MAPE*), средняя абсолютная ошибка (*MAE*), коэффициент вариации среднеквадратичной ошибки (*CV-RMSE*) и коэффициент детерминации (R^2).

Корень из среднеквадратичной ошибки измеряет среднюю разницу между значениями, спрогнозированными моделью прогнозирования, и фактическими значениями:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y(x) - a_L)^2}.$$

Чем ниже значение корня средней квадратичной ошибки, тем лучше модель прогнозирования. Корень средней квадратичной ошибки имеет преимущество в том, что представляет величину ошибки в единицах измерения прогнозируемого столбца, что упрощает процесс интерпретации.

Средняя абсолютная процентная ошибка:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y(x) - a_L}{y(x)} \right| \cdot 100 \ %.$$

Средняя абсолютная ошибка – среднее абсолютных разностей между целевым значением и значением, предсказанным моделью:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y(x) - a_L|.$$

В отличие от среднеквадратических ошибок, где используется квадрат разности, средняя абсолютная ошибка является линейной оценкой, поэтому вес разностей одинаков независимо от диапазона.

Коэффициент вариации среднеквадратичной ошибки

$$CV-RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (y(x) - a_L)^2}}{\frac{1}{n} \sum y(x)} \cdot 100 \ %.$$

Коэффициент детерминации – это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y(x) - a_L)^2}{\sum \left(y(x) - \frac{1}{n} \sum y(x) \right)^2}.$$

При сборе данных с интеллектуальных тепловых счетчиков необходимо всегда учитывать возможность утечки конфиденциальной информации, а также проблем, связанных с сетями передачи данных. Данные, полученные с помощью реальных измерительных устройств, всегда подвержены шуму, выбросам, отсутствующим значениям и дублирующим значениям, поэтому перед использованием полученных данных необходимо произвести процесс очистки. Процесс очистки данных выполняется для того, чтобы сначала обнаружить, а затем интерполировать выявленные пропущенные и аномальные образцы.

Разделение набора данных необходимо для беспристрастной оценки эффективности прогнозирования. Достаточно случайным образом разделить набор данных на тренировочный набор данных, который применяется для обучения модели, а также на набор тестов, который необходим для объективной оценки окончательной модели. Разделение произведено случайным образом в отношении два к одному в пользу тренировочного набора данных.

Результаты моделирования сведены в табл. 1, в которой параметры представляют соответственно: среднесуточную температуру наружного воздуха T , °С, относительную влажность H , %, скорость ветра W , км/ч, облачность C , % и солнечную энергию S , МДж/(м²·сут.). В каждой строке цветом выделены первичные независимые параметры, по которым проводилось моделирование.

Таблица 1

Сравнение точности различных моделей
Comparison of accuracy of various models

№ п/п	T	H	W	C	S	$RMSE$	$MAPE$	MAE	$CV-RMSE$	R^2
1						0,578	18,6	0,419	17,45	0,915
2						0,579	17,4	0,404	17,49	0,915
3						0,572	18,9	0,402	17,28	0,917
4						0,571	18,6	0,402	17,27	0,917
5						0,643	19,0	0,438	19,44	0,894
6						0,601	19,4	0,425	18,18	0,908
7						0,576	18,1	0,403	17,40	0,915
8						0,594	17,1	0,407	17,96	0,910
9						0,647	21,0	0,441	19,54	0,893
10						0,599	19,8	0,421	18,09	0,909
11						0,681	21,7	0,469	20,58	0,882
12						0,671	20,4	0,463	20,28	0,885
13						0,690	20,9	0,497	20,84	0,879
14						0,746	24,0	0,506	22,53	0,858
15						0,748	24,6	0,518	22,61	0,857

На рис. 4 изображены тренировочный, тестовый и предсказанный наборы данных, служащие для демонстрации работы нейронной сети прогнозирования теплового потребления здания.

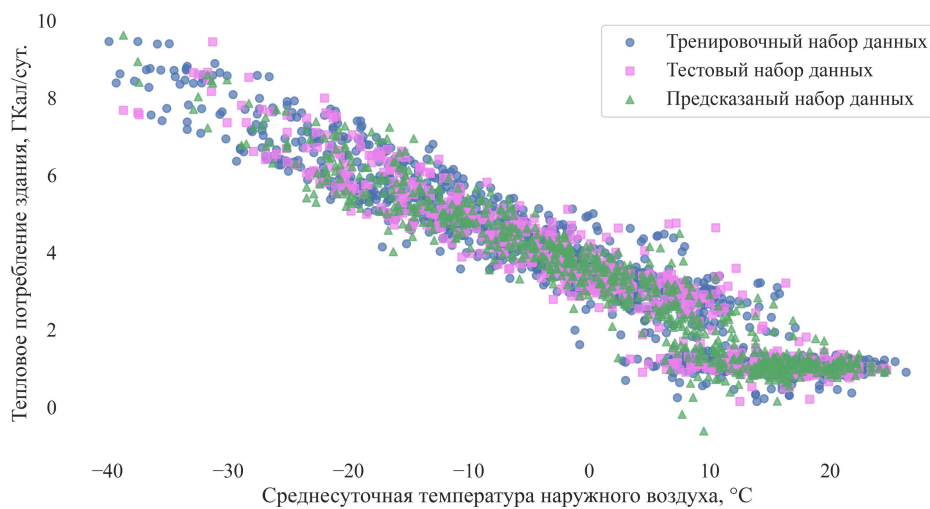


Рис. 4. Пример результатов предсказания нейронной сети прогнозирования теплового потребления здания

Fig. 4. Example of neural network prediction results for forecasting building heat consumption

Из рис. 4 видно, что модель прогнозирования учитывает нелинейность в характере распределения данных. Сравнение оригинальных значений и значений, полученных с использованием модели предсказания, на всем временном интервале, показано на рис. 5.

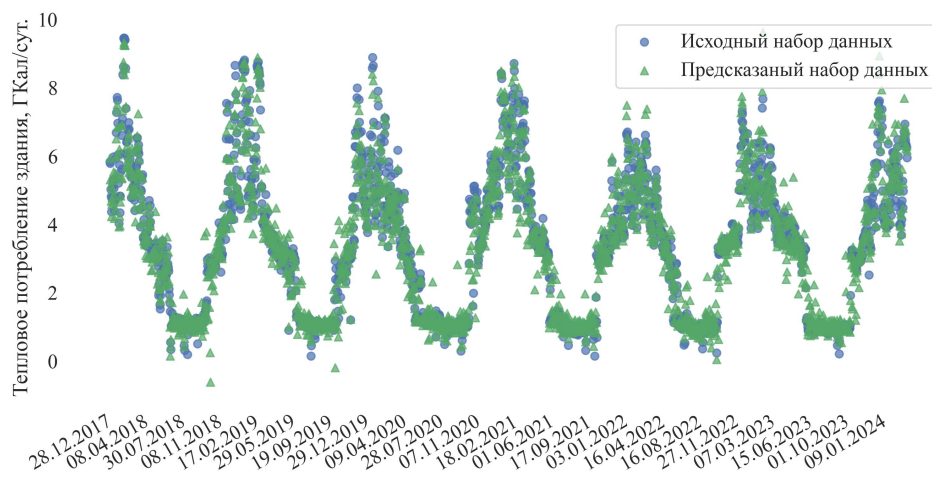


Рис. 5. Сравнение оригинальных значений и значений, полученных с использованием модели предсказания, на всем временном интервале

Fig. 5. Comparison of original values and values obtained using the prediction model over the entire time interval

При рассмотрении системы отопления следует отметить, что период ее работы значительно меньше целого года, а значит, модель должна это отражать. Поэтому в качестве исходных данных для модели отберем

только те данные, которые соответствуют периоду отопления здания, и повторим процесс.

Полученные значения коэффициентов корреляции параметров модели прогнозирования энергопотребления за отопительный период представлены на рис. 6.

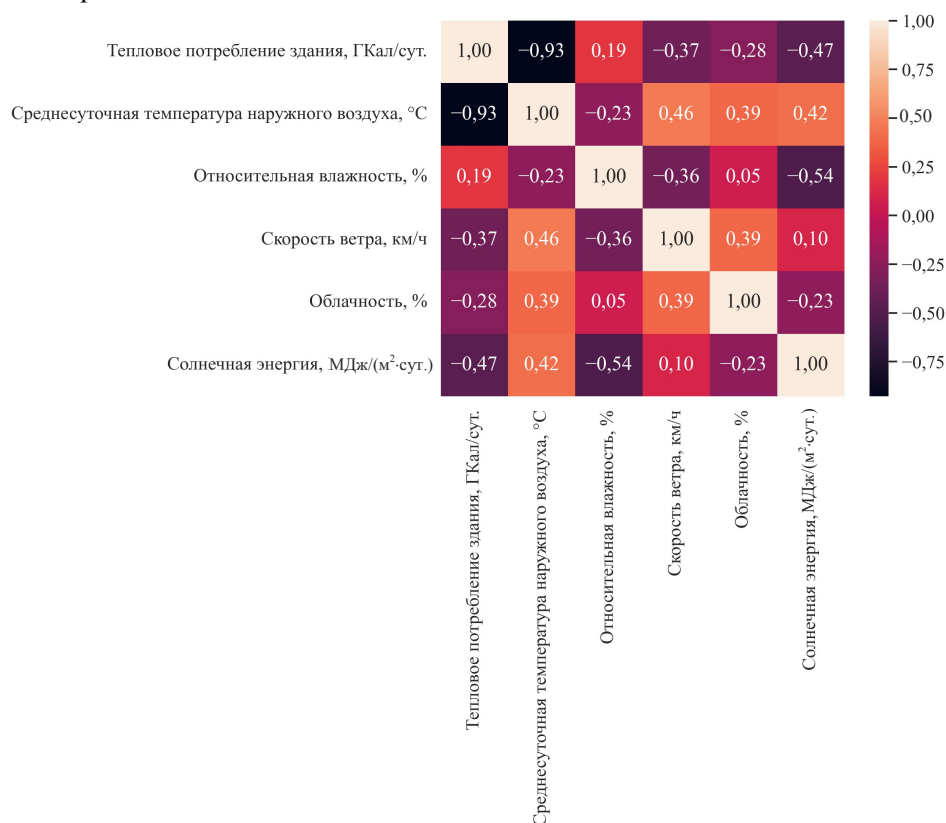


Рис. 6. Значения коэффициентов корреляции параметров модели прогнозирования энергопотребления за отопительный период

Fig. 6. Values of the correlation coefficients of the parameters of the energy consumption forecasting model for the heating period

Рис. 6 показывает, что наибольшее абсолютное значение коэффициента корреляции наблюдается между тепловым потреблением здания и среднесуточной температурой наружного воздуха. Значения коэффициентов корреляции между тепловым потреблением здания и остальными параметрами резко возросли, что говорит о том, что в отопительный период изменение данных параметров оказывает более сильное влияние на тепловое потребление здания.

Построим диаграмму рассеяния для данных за отопительный период, представленную на рис. 7.

Как можно видеть из рис. 7, значения относительной влажности скорости ветра и солнечной радиации сходятся к постоянному значению при уменьшении температуры.

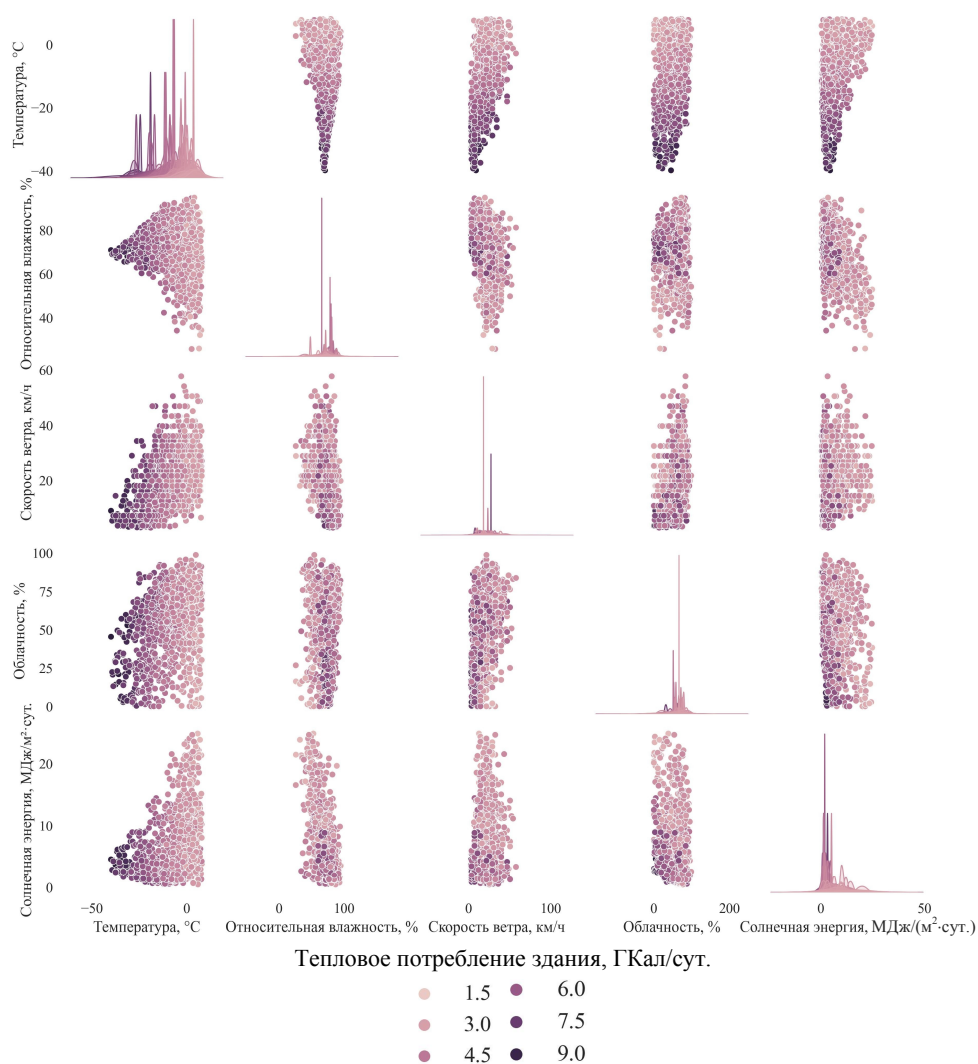


Рис. 7. Диаграмма рассеяния параметров модели прогнозирования энергопотребления за отопительный период

Fig. 7. Scatter diagram of the parameters of the energy consumption forecasting model for the heating period

Проведем моделирование на новой выборке данных, представляющих исключительно отопительный период. В данной модели сети также использовались три промежуточных слоя, но в отличие от предыдущего случая в двух первых слоях вместо функции активации ReLU использовалась функция активации “sigmoid”. Результаты моделирования сведены в табл. 2.

Для демонстрации работы нейронной сети прогнозирования теплового потребления здания изобразим тренировочный, тестовый и предсказанный наборы данных для отопительного периода, как показано на рис. 8.

Таблица 2

Сравнение точности различных моделей
Comparison of accuracy of various models

№ п/п	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>W</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAPE</i>	<i>MAE</i>	<i>CV-RMSE</i>	<i>R</i> ²
1						0,535	8,69	0,411	11,33	0,851
2						0,513	8,52	0,400	10,87	0,863
3						0,505	8,30	0,387	10,70	0,867
4						0,512	8,69	0,399	10,84	0,864
5						0,503	8,43	0,392	10,67	0,868
6						0,510	8,41	0,392	10,80	0,865
7						0,522	8,52	0,397	11,06	0,858
8						0,499	8,04	0,383	10,58	0,870
9						0,503	8,02	0,372	10,67	0,868
10						0,506	8,30	0,390	10,72	0,867
11						0,536	8,36	0,402	11,35	0,851
12						0,545	8,61	0,398	11,55	0,845
13						0,540	9,25	0,419	11,44	0,848
14						0,533	8,33	0,389	11,29	0,852
15						0,556	9,27	0,423	11,78	0,839

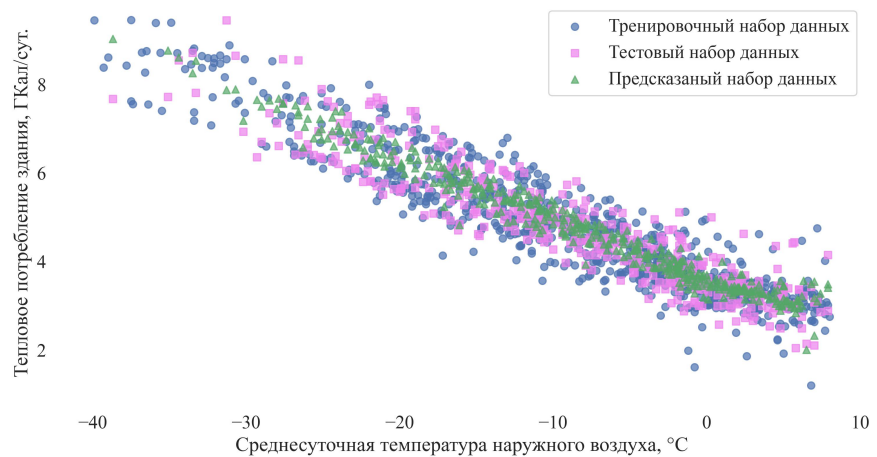


Рис. 8. Пример результатов предсказания нейронной сети
прогнозирования теплового потребления здания для отопительного периода

Fig. 8. Example of neural network prediction results for forecasting building
heat consumption for the heating period

Из рис. 8 можно увидеть, что модель прогнозирования также учитывает нелинейность в характере распределения данных. Сравнение оригиналь-

ных значений и значений, полученных с использованием модели предсказания на всем временном интервале, показано на рис. 9.

Чтобы оценить точность моделирования, проведем сравнение средней абсолютной процентной ошибки лучшей модели прогнозирования со значением предела допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии измерительным каналом теплосчетчика.

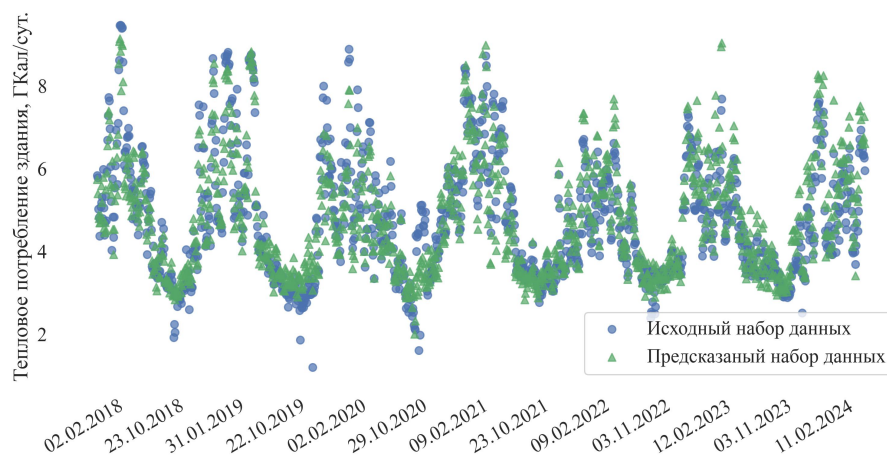


Рис. 9. Сравнение результатов предсказания нейронной сети и исходных данных теплового потребления здания для отопительного периода

Fig. 9. Comparison of neural network prediction results and initial data on building heat consumption for the heating season

Согласно нормативным данным, значение максимального предела допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии измерительным каналом теплосчетчика составляет 5 %. Значение средней абсолютной процентной ошибки лучшей модели прогнозирования составило примерно 8 %, что сравнимо со значением максимального предела допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии измерительным каналом теплосчетчика, и может быть использовано для практических целей.

Для исследований, основанных на данных, их объем и качество серьезно влияют на выбор используемых методов и точность получаемых результатов. В последние годы быстро появляются новые алгоритмы машинного обучения, что в будущем может позволить получать точность моделей прогнозирования, стремящуюся к точности реальных приборов измерения тепловой энергии, поэтому разработка процедур обучения, и определения наилучшего набора входных данных, безусловно, заслуживают изучения. Нейронные сети, созданные для различных объектов, могут иметь различный порядок важности входных признаков. Если предполагается прогнозирование с учетом внутренних факторов здания, таких как из-

менение физических характеристик, функций здания, состояния людей и факторов внутренней среды, то оптимальный набор входных характеристик и уровней важности также могут существенно отличаться.

Данные модели прогнозирования обучаются и тестируются на основе реальных исторических погодных данных, зарегистрированных коммунальными предприятиями и метеостанциями. Это означает, что в таких данных нет неопределенности. Для прогнозирования теплового спроса могут быть доступны только данные прогноза погоды, которые, безусловно, содержат ошибки прогнозирования. Следовательно, модели прогнозирования теплового потребления наилучшим образом подходят не для прогнозирования будущего теплового спроса, а для прогнозирования результатов применения энергосберегающих решений.

ВЫВОДЫ

1. Получены значения коэффициентов корреляции параметров модели прогнозирования энергопотребления, которые позволяют продемонстрировать зависимости выбранных параметров друг от друга, что является необходимым условием ранжирования этих параметров, дающих преобладающий вклад. Установлено, что коэффициенты корреляции между тепловым потреблением здания и климатологическими параметрами, рассчитанные для отопительного периода, значительно превышают аналогичные показатели, полученные по данным за календарный год.

2. Построены модели теплопотребления зданий с использованием искусственного интеллекта по данным, полученным в результате пятилетнего мониторинга теплогидравлических режимов тепловых пунктов зданий г. Красноярска.

3. Произведено сравнение точности моделей с различными наборами входных параметров по нескольким критериям. Показано, что точность лучшей модели прогнозирования сопоставима со значением предела допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии измерительным каналом теплосчетчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, C. Role of Input Features in Developing Data-Driven Models for Building Thermal Demand Forecast / C. Wang, X. Li, Hailong Li // *Energy & Buildings*. 2022. Vol. 277. P. 112593. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112593>.
2. Evaluation of Methods to Assess the Uncertainty in Estimated Energy Savings / S. Touzani, J. Grandersona, D. Jumpb, D. Rebello // *Energy & Buildings*. 2019. Vol. 193. P. 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.041>.
3. Langner, F. Model Predictive Control of Distributed Energy Resources in Residential Buildings Considering Forecast Uncertainties / F. Langner, W. Wang, V. Hagenmeyer // *Energy & Buildings*. 2024. Vol. 303. P. 113753. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113753>.
4. Comparative Study of Univariate and Multivariate Strategy for Short-Term Forecasting

- of Heat Demand Density: Exploring Single and Hybrid Deep Learning Models / S. Salehi, M. Kavgić, H. Bonakdari, L. Begnoche // *Energy and AI*. 2024. Vol. 16. P. 100343. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100343>.
5. Building Heating Load [Forecasting Based on the Theory of Transient Heat Transfer and Deep Learning / Z. Shi, R. Zheng, R. Shen [et al.] // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 313. P. 114290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114290>.
6. Forecasting Building Energy Demand and On-Site Power Generation for Residential Buildings Using Long and Short-Term Memory Method with Transfer Learning / D. Kim, G. Seomun, Y. Lee [et al.] // *Applied Energy*. 2024. Vol. 368. P. 123500. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123500>.
7. Mohan, R. An Ensemble Model for the Energy Consumption Prediction of Residential Buildings / R. Mohan, N. Pachauri // *Energy*. 2025. Vol. 314. P. 134255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134255>.
8. A Novel Intelligent Modeling and Prediction of Heat Energy Consumption in Smart Buildings / M. Jayashankara, A. Sharma, A. Kumar Singh [et al.] // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 310. P. 114105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114105>.
9. Application of the Hybrid Neural Network Model for Energy Consumption Prediction of Office Buildings / L. Wang, D. Xie, L. Zhou, Z. Zhang // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 72. P. 106503. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106503>.
10. Седнин, А. В. Энергоэффективность применения гибридных тепловых пунктов в условиях интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов. Ч. 1: Обоснование целесообразности применения гибридных тепловых пунктов / А. В. Седнин, М. И. Позднякова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 6. С. 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566>.
11. Моделирование и расчет параметров малой гелиотеплицы с целью повышения энергоэффективности / Г. Н. Узиков, В. А. Седнин, А. Б. Сафаров [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 4. С. 367–384. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-367-384>.
12. Колосов, М. В. Система мониторинга теплопотребления зданий / М. В. Колосов, А. Ю. Липовка, Ю. Л. Липовка // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335, № 7. С. 206–220. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4443>.

Поступила 25.09.2025 Подписана в печать 27.11.2025 Опубликована онлайн 30.01.2026

REFERENCES

1. Wang C., Li X., Li H. (2022) Role of Input Features in Developing Data-Driven Models for Building Thermal Demand Forecast. *Energy and Buildings*, 277, 112593. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112593>.
2. Touzani S., Granderson J., Jump D., Rebello D. (2019) Evaluation of Methods to Assess the Uncertainty in Estimated Energy Savings. *Energy and Buildings*, 193, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.041>.
3. Langner F., Wang W., Frahm M., Hagenmeyer V. (2024) Model Predictive Control of Distributed Energy Resources in Residential Buildings Considering Forecast Uncertainties. *Energy and Buildings*, 303, 113753. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113753>.
4. Salehi S., Kavgić M., Bonakdari H., Begnoche L. (2024) Comparative Study of univariate and Multivariate Strategy for Short-Term Forecasting of Heat Demand Density: Exploring Single and hybrid Deep Learning Models. *Energy and AI*, 16, 100343. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100343>.
5. Shi Z., Zheng R., Shen R., Yang D., Wang G., Liu Y., Zhao J. (2024) Building Heating Load Forecasting Based on the Theory of Transient Heat Transfer and Deep Learning. *Energy and*

- Buildings*, 313, 114290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114290>.
6. Kim D., Seomun G., Lee Y., Cho H., Chin K., Kim M.-H. (2024) Forecasting Building Energy Demand and On-Site Power Generation for Residential Buildings Using Long and Short-Term Memory Method with Transfer Learning. *Applied Energy*, 368, 123500. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123500>.
 7. Mohan R., Pachauri N. (2025) An Ensemble Model for the Energy Consumption Prediction of Residential Buildings. *Energy*, 314, 134255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134255>.
 8. Jayashankara M., Sharma A., Singh A. K., Chanak P., Singh S. K. (2024) A Novel Intelligent Modeling and Prediction of Heat Energy Consumption in Smart Buildings. *Energy and Buildings*, 310, 114105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114105>.
 9. Wang L., Xie D., Zhou L., Zhang Z. (2023) Application of the Hybrid Neural Network Model for Energy Consumption Prediction of Office Buildings. *Journal of Building Engineering*, 72, 106503. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106503>.
 10. Sednin A. V., Pozdnyakova M. I. (2023) Energy Efficiency of Using Hybrid Heating Points in Conditions of Integration of Electrical and Thermal Networks of Urban Neighborhoods. Part 1. Justification of the Feasibility of Using Hybrid Thermal Points. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (6), 552–566 <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566> (in Russian).
 11. Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Rakhmatov O. I. (2025) Simulation and Calculation of Parameters of a Small Solar Greenhouse in Order to Increase its Energy Efficiency. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (4), 367–384. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-367-384> (in Russian).
 12. Kolosov M. V., Lipovka A. Yu., Lipovka Yu. L. (2024) System for Monitoring Building Heat Consumption. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 335 (7), 206–220. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4443> (in Russian).

Received: 25 September 2025 Accepted: 27 November 2025 Published online: 30 January 2026