

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311.1.003

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.1.2>

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Владимир Иосифович Полищук¹, Всеволод Андреевич Ткаченко^{2*},
Александр Олегович Шепелев³

^{1, 2, 3} Югорский государственный университет (д. 16, ул. Чехова, Ханты-Мансийск, 628012, Российская Федерация)

¹ v_polishchuk@ugrasu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>

² v_tkachenko@ugrasu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7321-1162>

³ a_shepelev@ugrasu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5757-9653>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. В статье рассматривается применение методов эволюционной оптимизации в задачах расчета установившегося режима электрической сети, в частности речь пойдет о генетических алгоритмах. **Цель.** Описание метода популяционной оптимизации, который может быть использован для расчета установившегося режима электрической сети. **Материалы и методы.** Объектом исследования является алгоритм популяционной оптимизации. Предметом исследования является целевая функция генетического алгоритма, применяемая для нахождения уровней напряжений в узлах электрической сети. Используются метод оптимизации, основанный на генетических алгоритмах, а также классический метод Ньютона для расчета установившегося режима электрической сети. **Результаты и обсуждение.** В работе представлены основные элементы генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети, определена оптимизируемая целевая функция, а также приведены результаты расчета по сравнению с методом Ньютона. **Заключение.** По итогам проведенного исследования сделан вывод о том, что расчет установившегося режима можно рассматривать с точки зрения оптимизационной задачи небалансов мощности, использование генетического алгоритма для расчета режима электрической сети возможно, однако точность результатов сильно зависит от количества итераций, хоть и не требует больших вычислительных мощностей и сложных вычислений.

Ключевые слова: генетический алгоритм, расчет установившегося режима, электрическая сеть, оптимизация
Для цитирования: Полищук В. И. Расчет установившегося режима электрической сети с применением генетического алгоритма/В.И. Полищук, В.А. Ткаченко, А.О. Шепелев//Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 1(106). С. 21–28. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.1.2>

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания «Лаборатория искусственного интеллекта электроэнергетических систем» (код темы: FENG-2024-0007).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.01.2025;

одобрена после рецензирования 01.02.2025;

принята к публикации 01.03.2025.

Research article

CALCULATION OF THE STEADY-STATE MODE OF THE ELECTRIC NETWORK USING A GENETIC ALGORITHM

Vladimir I. Polischuk¹, Vsevolod A. Tkachenko^{2*}, Aleksandr O. Shepelev³

^{1, 2, 3} Yugra State University (16, Chekhov str., Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation)

¹ v_polishchuk@ugrasu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>

² v_tkachenko@ugrasu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7321-1162>

³ a_shepelev@ugrasu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5757-9653>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. This article discusses the application of evolutionary optimization methods in problems of calculating the steady-state mode of an electrical network, in particular, genetic algorithms. **Goal.** Description of the population optimization method, which can be used to calculate the steady state of the electric network. **Materials and methods.** The object of the study is the population optimization algorithm. The subject of the study is the objective function of the genetic algorithm, which can be used to find voltage levels in the nodes of the electric network. The methods used in the work include an optimization method based on genetic algorithms, as well as the classical Newton method for calculating the steady-state mode of an electrical network. **Results and discussion.** The paper presents the main elements of a genetic algorithm for calculating the steady-state mode of an electrical network, defines an optimized target function, and presents the calculation results in comparison with Newton method. **Conclusion.** Based on the results of the conducted study, it can be concluded that the calculation of the steady state can be considered from the point of view of the optimization problem of power imbalances, the use of a genetic algorithm for calculating the electrical network mode is possible, but the accuracy of the results strongly depends on the number of iterations, although it does not require large computing power and complex calculations.

Keywords: genetic algorithm, steady state calculation, electrical network, optimization

For citation: Polischuk VI, Tkachenko VA, Shepelev AO. Calculation of the steady-state mode of the electric network using a genetic algorithm. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;1(106):21-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.1.2>

Funding: the research was carried out within the framework of the state assignment "Laboratory of Artificial Intelligence of Electric Power Systems" (subject code: FENG-2024-0007).

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 01.01.2025;

approved after reviewing 01.02.2025;

accepted for publication 01.03.2025.

Введение / Introduction. Внедрение инструментов искусственного интеллекта (ИИ) в различные сферы человеческой деятельности увеличивается с каждым годом. Это касается различных информационных технологий, таких как популяционные алгоритмы, различные нейросетевые модели для машинного обучения и т. д.

В задачах электроэнергетического комплекса также используются методы ИИ, однако в большей степени решаются задачи компенсации реактивной мощности (определение местоположений компенсирующих устройств, их мощности), определения местоположения объектов генерации, распределения и потребления электрической энергии. Расчет режимов с применением генетических алгоритмов (в целом эвристических методов) описан в литературе недостаточно, хотя и имеет потенциал разработки программных инструментов для расчета и оптимизации режимов электроэнергетических систем.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Так, в работе [1–3] рассматриваются задачи электроэнергетики, связанные с диагностикой электрооборудования посредством нейронных сетей. С систем диагностики оборудования снимаются показатели состояния структурных единиц, и в результате делается вывод об общем состоянии системы. На данных с систем диагностики и общем состоянии обучаются нейронные сети (метод обучения с учителем), которые в дальнейшем при возникновении новых наборов данных могут прогнозировать текущее состояние оборудования.

Методами ИИ, представленными в [4, 5], возможно прогнозирование временных рядов, в частности графиков электрических нагрузок и цен на электрическую энергию, для повышения эффективности использования энергосистем.

Применение популяционных методов оптимизации возможно в задачах расчета режимов: определение расположения и величины мощности компенсирующих устройств в узлах энергосистемы, поиск места расположения центра электрических нагрузок, определение трасс линий электропередачи и других режимно-структурных параметров электрических сетей [6–10].

В данной работе рассматривается расчет установившегося режима электрической сети с применением генетического алгоритма. Задача расчета режима представляется как задача оптимизации (поиск минимума) кумулятивной функции небалансов мощности в узлах сети, кроме базисного узла.

Использование генетического алгоритма как средства для определения уровней напряжений в узлах электрической сети обуславливается расширением областей применения популяционных алгоритмов в задачах электроэнергетического комплекса. Описанный в данной работе метод расчета режима, основанный на применении генетического алгоритма, не предлагается как замена классических методов расчета, изложенных в [11].

Основные положения биологически обусловленных и популяционно-ориентированных подходов к компьютерному интеллекту описаны в работе Дэна Саймона [12].

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Опишем получение целевой функции генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети.

В общем случае уравнения установившегося режима электрической сети являются нелинейными. Рассмотрим решение узловых уравнений баланса мощности. Запишем уравнение узловых напряжений в форме баланса мощности для i -го узла в следующем виде:

$$\Delta \dot{S}_i = \dot{S}_i + Y_{ii}^* \dot{U}_i^* U_j^* + \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} Y_{ij}^* \dot{U}_i^* U_j^*, \quad (1)$$

где $\Delta \dot{S}_i^*$ – комплекс небаланса мощности i -го узла, МВ·А; $\dot{S}_i$ – задающая мощность i -го узла, МВ·А; Y_{ii}^* – комплексно-сопряженное значение собственной проводимости i -го узла, См; Y_{ij}^* – комплексно-сопряженное значение взаимной проводимости между узлами i и j , См; $\dot{U}_i^*$, U_i^* – комплекс и комплексно-сопряженное значение напряжения i -го узла, кВ; U_j – комплексно-сопряженное значение напряжения j -го узла, кВ; n – количество узлов, кроме базисного узла.

В настоящее время с широким применением высокоуровневых языков программирования общего назначения, например Python, возможно использование уравнения (1) для расчета небалансов без разделения переменных и отдельного расчета по активной и реактивной мощностям.

В таком случае для примера сети, где узел 1 является базисным, имеем следующие небалансы по мощности:

$$\Delta \dot{S} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 + j\Delta Q_1 \\ \Delta P_2 + j\Delta Q_2 \\ \dots \\ \Delta P_i + j\Delta Q_i \\ \dots \\ \Delta P_{n+1} + j\Delta Q_{n+1} \end{bmatrix} MB \cdot A. \quad (2)$$

Контроль достижения достаточной точности методом Ньютона осуществляется по вектору невязок (матричная форма), т. е. по условию

$$\left| \Delta \dot{S}_i \left(\dot{U}^{(m)} \right) \right| \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где ε – заданная точность расчета, МВ·А; $\dot{U}^{(m)}$ – вектор-столбец комплексов напряжений в узлах на итерации m , кроме базисного.

По выражению (3) видно, что для окончания расчета необходимо, чтобы модули небалансов полной мощности для каждого узла (кроме базисного) были меньше установленного значения точности.

Из выражения (3) можно получить целевую функцию несколькими способами.

Для случая, когда расчет ведется в декартовых координатах с разделением на активную и реактивную мощности небаланса i -го узла, целевую функцию можно определить как

$$f(\dot{U}) = \left| \sum_{i=2}^{n+1} |\Delta P_i| + j \sum_{i=2}^{n+1} |\Delta Q_i| \right|. \quad (4)$$

Для случая без разделения переменных имеем

$$f(\dot{U}) = \sum_{i=2}^{n+1} |\Delta \dot{S}_i| \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) имеем дело с кумулятивной функцией небалансов мощности узлов. В случае приближения к искомому значению напряжений каждая из составляющих небалансов будет стремиться к нулю, следовательно, целевая функция также будет стремиться к нулю.

Таким образом, при использовании выражений (4) и (5) становится возможным поиск вектора напряжений узлов, при котором достигаются минимальные значения. Рассмотрим пример расчета установившегося режима электрической сети с применением генетического алгоритма.

Имеется трехузловая кольцевая сеть с номинальным напряжением 110 кВ, представленная на рис. 1, данные схемы – в табл. 1.

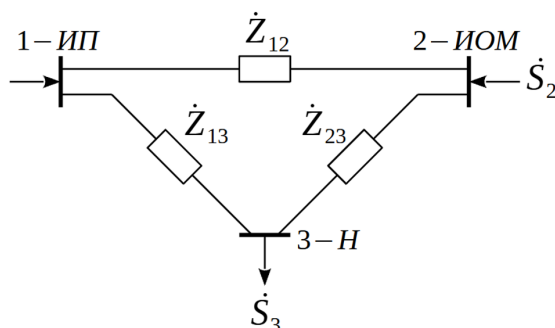


Рис. 1. Расчетная схема электрической сети: ИП – базисный узел, источник питания; ИОМ – источник ограниченной мощности; Н – узел нагрузки / Fig. 1. Calculation diagram of the electrical network: IP – base node, power source; IOM – limited power source; H – load node

*Источник: составлено авторами по данным [13] / *Source: compiled by authors according to data [13]

Таблица 1 / Table 1

Исходные данные расчетной сети / Initial data of the calculation network

$\dot{S}_2$, МВ·А	$28,8675 + j17,3205$	$\dot{Z}_{13}$, Ом	$15 + j30$
$\dot{S}_3$, МВ·А	$46,1880 + j23,0940$	$\dot{Z}_{23}$, Ом	$10 + j25$
$\dot{Z}_{12}$, Ом	$10 + j20$	$\dot{U}_1$, кВ	$115 + j0$

*Источник: составлено авторами по данным [13] / *Source: compiled by the authors according to data [13]

Общей частью для всех расчетов будет составление матрицы собственных и взаимных проводимостей узлов по уравнению

$$\dot{Y} = M \cdot \left[\text{diag}(\dot{Z}) \right]^{-1} \cdot M^T, \quad (6)$$

где M – матрица инцидентности ориентированного графа для рассматриваемой расчетной схемы; $\dot{Z}$ вектор-столбец сопротивлений ветвей.

Для рассматриваемой сети (рис. 1), в результате расчета по выражению (6) получим

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} 0,033 - j0,067 & -0,020 + j0,040 & -0,013 + j0,027 \\ -0,020 + j0,040 & 0,034 - j0,074 & -0,014 + j0,034 \\ -0,013 + j0,027 & -0,014 + j0,034 & 0,027 - j0,061 \end{bmatrix} C_{\text{м}} \quad (7)$$

В источнике [13] данная сеть рассматривается без ёмкостных проводимостей ветвей, что некорректно для линий электропередачи на 110 кВ [11]. В целях сравнения результатов также опустим в расчетах влияние на режим сети поперечных ветвей линий электропередачи.

При наличии активных и ёмкостных проводимостей ветвей необходимо скорректировать матрицу собственных и взаимных проводимостей следующим образом

$$\dot{Y}' = M \cdot \begin{bmatrix} G_{\text{л}1} + jB_{\text{л}1} \\ G_{\text{л}2} + jB_{\text{л}2} \\ \dots \\ G_{\text{л}i} + jB_{\text{л}i} \\ \dots \\ G_{\text{л}l} + jB_{\text{л}l} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\dot{Y} = \dot{Y}' - \text{diag}(\dot{Y}^*) \quad (9)$$

где M – матрица инцидентности неориентированного графа для рассматриваемой расчетной схемы; $G_{\text{л}i} = \frac{g_{0i} \cdot L_i \cdot n_{\text{ц}i}}{2}$ и $B_{\text{л}i} = \frac{b_{0i} \cdot L_i \cdot n_{\text{ц}i}}{2}$ – активная и ёмкостная проводимости i -й линии электропередачи (ветви), См; l – количество линий электропередачи (ветвей); g_{0i} и b_{0i} – погонные активная и ёмкостная проводимости i -й линии электропередачи, См/км; L_i – длина i -й линии электропередачи, км; $n_{\text{ц}i}$ – количество цепей i -й линии электропередачи.

Генотип особи для генетического алгоритма будет состояться из следующих данных:

- модуль напряжения в узле $2U_2$: от 99 кВ до 121 кВ с шагом 0,001 кВ;
- фаза напряжения в узле $2\delta_2$: от минус 3,142 до 3,142 с шагом 0,001;
- модуль напряжения в узле $3U_3$: от 99 кВ до 121 кВ с шагом 0,001 кВ;
- фаза напряжения в узле $3\delta_3$: от минус 3,142 до 3,142 с шагом 0,001.

Таким образом, количество возможных вариантов приблизительно равно $1,912 \cdot 10^{16}$.

Параметры генетического алгоритма представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Параметры генетического алгоритма / Genetic Algorithm Parameters

Способ записи генотипа особи	код Грея
Генерация начальной популяции	случайные набор
Тип выбора родителей	стохастическая универсальная выборка

Цель оптимизации	поиск минимума
Тип рекомбинации	точечная
Количество точек рекомбинации	4
Замена популяции (при переходе на новое поколение)	элита, 20 %
Количество особей в популяции	100
Количество эпох (поколений)	10 000
Условия останова поиска	неизменяемость
Счетчик изменений лучшей особи	10
Вероятность мутации	5 %
Количество допустимых повторений особи в популяции	2

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

В результате работы генетического алгоритма неизменяемость результатов достигается на 112 поколений, и алгоритм прекращает работу. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Результаты расчета / Calculation results

	$U_2, \text{кВ}$	$\delta_2, \text{рад}$	$U_3, \text{рад}$	$\delta_3, \text{рад}$	Значение целевой функции
Генетический алгоритм (112 поколений)	115,873	0,002	110,206	–0,038	0,629
Генетический алгоритм (10 000 поколений)	115,914	0,002	110,238	–0,038	0,477
Метод Ньютона	115,916	0,002	110,249	–0,037	

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Заклучение / Conclusion. В результате работы была определена целевая функция, с помощью которой задачу расчета установившегося режима можно рассматривать как задачу оптимизации. Сравнение полученных результатов проводилось методом Ньютона, который является классическим для расчета режимов. Погрешность при расчете составила менее 1 %, по параметру неизменчивости лучшего результата алгоритм сошелся через 112 итераций. Генетический алгоритм имеет худшую сходимость в отличие от метода Ньютона, однако не требует сложных вычислений и высоких вычислительных мощностей. Авторская реализация метода Ньютона и генетического алгоритма размещены в источниках [14, 15].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Применение методов искусственного интеллекта в задачах технической диагностики электрооборудования электрических систем: монография / В. З. Манусов, В. М. Левин, А. И. Хальясмаа, Дж. С. Ахъёев; под общ. ред. В. З. Манусова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. 446 с.
2. Солодянкин М. С. Анализ применения искусственных нейронных сетей для оценки технического состояния силовых трансформаторов 6-10 КВ / М. С. Солодянкин, В. Д. Колонцов, В. А. Ткаченко // Вестник Югорского государственного университета. 2024. Т. 20. № 4. С. 51–54. <https://doi.org/10.18822/byusu20240451-54>
3. Лобанов В. А. Исследование возможности применения искусственной нейронной сети для задачи классификации режима работы электрической сети / В. А. Лобанов, К. Р. Валиуллин // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием), Оренбург, 23–25 января 2020 года. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2020. С. 2751–2758.

4. Каукин А. С. Краткосрочное прогнозирование цен на электроэнергию с использованием генеративных нейронных сетей / А. С. Каукин, П. Н. Павлов, В. С. Косарев // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 3. С. 7–23. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.3.7.23>
5. Вялкова С. А. Применение нейронных сетей для прогнозирования электропотребления мегаполиса / С. А. Вялкова, И. И. Надтока, О. А. Корнюкова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2023. Т. 10. № 4. С. 12–16. <https://doi.org/10.24892/RIJE/20230403>
6. Ткаченко В. А. Разработка методов и алгоритмов оптимизации схемно-режимных параметров электрических систем, включая минигрид: дис. ... канд. техн. наук / Ткаченко Всеволод Андреевич. Ханты-Мансийск, 2023. 223 с.
7. Magdy Mohamed El-Saadawi. A Genetic-Based Approach for Solving Optimal Power Flow Problem (Dept. E) // Mansoura Engineering Journal. 2020. Vol. 29. No. 2. P. 12–26.
8. César Augusto Hernández Suárez. Optimal Power Flow through Artificial Intelligence Techniques // Tecnura. 2021. Vol. 25. No. 69. P. 150–170.
9. Solopov R. V. Genetic algorithm as a tool for modeling calculations of electric power systems / R. V. Solopov, A. S. Samulchenkov, V. I. Ziryukin // Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. No. 6 (96). P. 43-53. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-6-43-53>
10. Утюж Т. И. Применение генетического алгоритма оптимизации при компенсации реактивной мощности / Т. И. Утюж // Молодой ученый. 2021. № 20 (362). С. 104-106.
11. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: монография / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, П. М. Ерохин, В. Г. Неуймин; под ред. П. И. Бартоломея. М.: Флинта; Наука, 2008. 256 с.: ил.
12. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации / пер. с англ. А. В. Логунова. М.: ДМК Пресс, 2020. 1002 с.: ил.
13. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.: ил.
14. GitHub. URL: https://github.com/Sevaat/Newtons_Method (дата обращения: 28.01.2025).
15. GitHub. URL: https://github.com/Sevaat/Genetic_Algorithm (дата обращения: 28.02.2025).

REFERENCES

1. Manusov VZ, Levin VM, Khalyasmaa AI, Akhyoev JS. Application of artificial intelligence methods in the problems of technical diagnostics of electrical equipment of electrical systems: monograph. Ed. VZ. Manusov. Novosibirsk: NSTU Publishing House; 2020. 446 p. (In Russ.).
2. Solodyankin MS, Kolontsov VD, Tkachenko VA. Analysis of the application of artificial neural networks for assessing the technical condition of 6-10 kV power transformers. Yugra State University Bulletin. 2024;20(4):51-54. <https://doi.org/10.18822/byusu20240451-54>. (In Russ.).
3. Lobanov VA, Valiullin KR. Study of the possibility of using an artificial neural network for the problem of classifying the operating mode of an electrical network. In University complex as a regional center of education, science and culture. Proceedings of the All-Russian scientific and methodological conference (with international participation), Orenburg, January 23-25, 2020. Orenburg: Orenburg State University; 2020. P. 2751-2758. (In Russ.).
4. Kaukin AS, Pavlov PN, Kosarev VS. Short-term forecasting of electricity prices using generative neural networks. Business informatics. 2023;17(3):7-23. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.3.7.23>. (In Russ.).
5. Vyalkova SA, Nadтока II, Korniyukova OA. Application of neural networks for forecasting the electricity consumption of a megalopolis. Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2023;10(4):12-16. <https://doi.org/10.24892/RIJE/20230403>. (In Russ.).
6. Tkachenko VA. Development of methods and algorithms for optimizing the circuit and mode parameters of electrical systems, including minigrd: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Khanty-Mansiysk; 2023. 223 p. (In Russ.).
7. Magdy Mohamed El-Saadawi. A genetic-based approach for solving optimal power flow problem (Dept. E). Mansoura Engineering Journal. 2020;29(2):12-26.
8. César Augusto Hernández Suárez. Optimal power flow through artificial intelligence techniques. Tecnura. 2021;25(69):150-170.
9. Solopov RV, Samulchenkov AS, Ziryukin VI. Genetic algorithm as a tool for modeling calculations of electric power systems. Journal of Applied Informatics. 2021;16(6(96)):43-53 <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-6-43-53>.
10. Utyuzh TI. Application of a genetic optimization algorithm for reactive power compensation. Molodoj uchenyj = Young scientist. 2021;20(362):104-106. (In Russ.).

11. Ayuyev BI, Davydov VV, Erokhin PM, Neuimin VG. Computational models of power flow distribution in electrical systems: monograph. Ed. PI. Bartolomey. Moscow: Flinta: Science; 2008. 256 p.: ill. (In Russ.).
12. Simon D. Evolutionary Optimization Algorithms. Trans. from English by AV Logunov. Moscow: DMK Press; 2020. 1002 p. (In Russ.).
13. Idelchik VI. Electrical Systems and Networks: Textbook for Universities. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 592 p. (In Russ.).
14. GitHub. Available from: https://github.com/Sevaat/Newtons_Method [Accessed 28 January 2025].
15. GitHub. Available from: https://github.com/Sevaat/Genetic_Algorithm [Accessed 28 January 2025].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Иосифович Полищук – доктор технических наук, профессор, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Scopus ID: 16478590800.

Всеволод Андреевич Ткаченко – кандидат технических наук, доцент Политехнической школы Югорского государственного университета, Scopus ID: 57210291005, Researcher ID: W-3652-2019.

Александр Олегович Шепелев – кандидат технических наук, доцент Политехнической школы Югорского государственного университета, Scopus ID: 57195281176, Researcher ID: A-6600-2017.

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Иосифович Полищук. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Всеволод Андреевич Ткаченко. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Александр Олегович Шепелев. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. Polischuk – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Professor of the Polytechnic School, Yugra State University, Scopus ID: 16478590800.

Vsevolod A. Tkachenko – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Polytechnic School, Yugra State University, Scopus ID: 57210291005, Researcher ID: W-3652-2019.

Alexandr O. Shepelev – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor of the Polytechnic School, Yugra State University, Scopus ID: 57195281176, Researcher ID: A-6600-2017.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. Polischuk. Approval of the final version – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Vsevolod A. Tkachenko. Conducting the study – collecting, interpreting and analyzing the data obtained.

Alexandr O. Shepelev. Preparing and editing the text – drafting the manuscript and forming its final version, participating in the scientific design.