

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311.027:621.3.016

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.1>

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПАССИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Наталья Ленмировна Бацева¹, Александр Константинович Жуйков^{2*}

^{1,2} Национальный исследовательский Томский политехнический университет (д. 30, проспект Ленина, Томск, 634050, Российская Федерация)

¹ batsevan@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-1808-4700>

² zhuykov_aleksandr@mai.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5333-1661>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Задание электрических нагрузок в виде статической характеристики нагрузки по напряжению позволяет повысить точность расчёта режимных параметров при определении допустимых режимов работы энергосистем. Для сбора массивов данных может быть использован пассивный эксперимент, однако статистическая обработка данных позволяет определить только линейные модели статических характеристик. Значительная погрешность при получении полиномиальной модели связана с малым диапазоном изменения напряжения в пассивном эксперименте и влиянием реакции сети на напряжение в узле нагрузки. **Цель** – разработка методики, позволяющей определить полиномиальные модели статических характеристик по напряжению из линейных моделей. **Материалы и методы.** В статье предложена методика, основанная на первоначальном определении линейной модели статических характеристик, определённых EM-алгоритмом кластеризации, с дальнейшим осуществлением оптимизации с ограничениями типа равенств по методу Лагранжа и применением итерационного метода Ньютона. **Результаты и обсуждение.** В результате получены полиномиальные модели статических характеристик нагрузки по напряжению для крупного промышленного потребителя. Коэффициенты полиномиальной модели были введены в программно-вычислительный комплекс для расчёта электрических режимов, и выполнено моделирование электрических режимов при последовательном изменении номинальных значений активной и реактивной мощностей узла нагрузки с фиксацией расчётных значений мощностей узла нагрузки, а также выполнено сравнение с типовыми моделями СХН по напряжению. **Заключение.** Величина дисперсии исходных измерений относительно расчётных точек показала, что определённые с помощью предлагаемой методики полиномиальные модели статических характеристик нагрузки по напряжению, обеспечивают более точное ведение режима, чем типовая модель.

Ключевые слова: статические характеристики нагрузки по напряжению, реакция сети, регулирующий эффект нагрузки по напряжению, кластеризация, EM-алгоритм, оптимизация, метод множителей Лагранжа, метод Ньютона

Для цитирования: Бацева Н. Л., Жуйков А. К. Идентификация полиномиальных моделей статических характеристик нагрузки по напряжению по результатам пассивного эксперимента // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 1 (100). С. 9–19. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.1>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.10.2023;
одобрена после рецензирования 19.10.2023;
принята к публикации 31.10.2023.

Research article

IDENTIFICATION OF POLYNOMIAL MODELS OF STATIC LOAD CHARACTERISTICS BASED ON PASSIVE EXPERIMENT RESULTS

Natalia L. Batseva¹, Aleksandr K. Zhuykov^{2*}

^{1,2} National Research Tomsk Polytechnic University (30, Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation)

¹ batsevan@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-1808-4700>

² zhuykov_aleksandr@mai.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5333-1661>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. Dependence of a load power from a voltage in the form of static load characteristics permits to improve the accuracy of regime calculations significantly. This fact is extremely important, when it is necessary to define the area of permissible operating regimes for power systems. The most technologically advanced approach to collect data for the static load characteristics identification is a passive experiment, but the statistical processing of data does not allow for the polynomial models identification. The problems in the statistical processing connect with the small range of voltage variations in a passive experiment and an influence of grid responsiveness to the voltage on load busses. **Goal** – develop-

ment of a technique that allows to determine polynomial models of static characteristics in terms of voltage from linear models. **Materials and methods.** In the paper, the technique based on the initial identification of the linear model, defined by EM-algorithm, and continued by the Lagrange multiplier method optimization with iterations by the Newton method is suggested. **Results and discussion.** As a result, for the large industrial consumer the polynomial models of the static load characteristics have been obtained. The polynomial model coefficients are installed into the software for regime calculations, and, then, the regime modeling with serial changes of active and reactive power nominal values, recording calculated values of powers on load busses and the comparison with standard models of static load characteristics are completed. **Conclusion.** The dispersion of initial data in reference to calculated data shows, that polynomial models of static load characteristics, identified by suggested technique, simulate the regime with the greater accuracy than standard models of static load characteristics.

Keywords: static load characteristics, network responsiveness, voltage-regulating effect of a load, clustering, EM-algorithm, optimization, Lagrange multiplier method, Newton method

For citation: Bateva NL, Zhuykov AK. Identification of polynomial models of static load characteristics based on passive experiment results. *Newsletter of North-Caucasus Federal University*. 2024;1(100):9-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.1>

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

The article was submitted 04.10.2023;

approved after reviewing 19.10.2023;

accepted for publication 31.10.2023.

Введение / Introduction. Для обеспечения высокой точности расчётов электрических режимов с помощью специализированных программных комплексов необходимо вводить в них модели узлов нагрузки таким образом, чтобы правильно воспроизвести поведение нагрузки в различных режимах работы энергорайонов энергосистем. Поэтому узлы нагрузки предпочтительно моделировать статическими характеристиками нагрузки (СХН) по напряжению, которые учитывают фактическую зависимость активной и реактивной мощностей нагрузки от напряжения [1].

Однако большинство моделей СХН по напряжению, представленных в программных комплексах для расчёта электрических режимов и используемых для моделирования узлов нагрузки, не являются фактическими и не соответствуют актуальному составу электроустановок в узле нагрузки. Это вносит значительную погрешность в расчёты, особенно при определении максимально и аварийно допустимых перепадов активной мощности, а также пределов устойчивости, что признаётся в исследованиях [2].

Определение фактических моделей СХН по напряжению осуществляется на основе измерений параметров режима, полученных при проведении активного или пассивного экспериментов для узла нагрузки и их обработки с помощью методов математической статистики [2–6]. Наиболее перспективным способом получения моделей СХН по напряжению является пассивный эксперимент, так как по сравнению с активным экспериментом он не ограничен по продолжительности и не предполагает внешнего вмешательства в работу энергосистемы [7]. Однако при обработке данных пассивного эксперимента достаточно точно можно определить только линейную модель СХН по напряжению, а при определении полиномиальной модели (1) и (2) возникает большая погрешность:

$$S(U) = S_{\text{БАЗ}} \cdot \left(z_0 + z_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} \right) + z_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} \right)^2 \right), \quad (1)$$

$$S(U) = Z_2 \cdot U^2 + Z_1 \cdot U + Z_0, \quad (2)$$

где z_0, z_1, z_2 – коэффициенты полиномиальной СХН для активной или реактивной мощностей в относительных единицах [8]; Z_0, Z_1, Z_2 – то же в именованных единицах; S – активная P или реактивная Q мощность нагрузки; U – напряжение в узле нагрузки; $S_{\text{БАЗ}}$ – значение активной или реактивной мощности при базисном напряжении $U_{\text{БАЗ}}$, в большинстве случаев, равно номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$ узла нагрузки.

Значительная погрешность при получении полиномиальной модели СХН связана с двумя факторами:

1) малый диапазон изменения напряжения в узле нагрузки, снижающий обусловленность системы уравнений для определения коэффициентов полиномиальной модели СХН, решаемой в матричном виде (3):

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{U})^{-1} \cdot \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{S}, \quad (3)$$

где \mathbf{Z} – вектор-столбец искоемых коэффициентов полиномиальной модели СХН; \mathbf{U} – вектор-столбец измерений напряжения в узле нагрузки; \mathbf{S} – вектор-столбец измерений активной или реактивной мощности нагрузки [2, 9].

Снижение влияния малой обусловленности системы (3) достигается за счёт первоначального определения не полиномиальной, а линейной модели СХН по напряжению, но точность определения

допустимых режимов работы энергосистемы при больших отклонениях напряжения от номинальных значений значительно снизиться [2, 4, 5];

2) влияние «реакции сети» при проведении пассивного эксперимента [7], приводящее к изменению напряжения в узле нагрузки при случайных или естественных колебаниях мощности. Применение регрессии для определения линейной модели СХН в этом случае приведёт к значительным погрешностям при расчётах электрических режимов [7, 10].

Для исключения влияния малой обусловленности в ряде работ, например, в [4, 10, 11] предлагается использовать методы кластеризации.

Методы учёта «реакции сети» при получении линейной и полиномиальной моделей СХН с применением методов кластеризации представлены в работах [2, 10-12], в том числе EM-алгоритмом [10, 13], однако в работе [2] предполагается, что изменение мощности нагрузки и напряжения происходит в широких пределах. В пассивных экспериментах не наблюдается более 10 % изменения напряжения в узле нагрузки от номинального напряжения, и в основном эти изменения напряжения связаны с естественными колебаниями мощности.

Поэтому разработка методики для определения полиномиальной модели СХН по напряжению при малом диапазоне изменения напряжения в узле нагрузки и с учётом влияния «реакции сети» актуальна.

Авторами [14] был предложен метод обработки измерений для получения полиномиальных моделей СХН по напряжению, однако он не лишен недостатков: необходимость в 5 независимых переменных и в процедуре коррекции базисной мощности после нахождения коэффициентов СХН, что в некоторых случаях приводит к неоднозначности получаемых результатов.

В качестве развития решений, приведённых в [14], представлена методика получения полиномиальной модели СХН по напряжению на основе линейной модели СХН, полученной с помощью EM-алгоритма кластеризации, с дальнейшей оптимизацией с ограничениями типа равенств и итерационного расчёта по методу Ньютона с меньшим числом независимых переменных и без необходимости коррекции базисной мощности.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Полиномиальные модели СХН по напряжению, получаемые в широком диапазоне изменения напряжения и учитывающие «реакцию сети», должны соответствовать условиям (4)–(6):

- обеспечивать минимальное отклонение σ расчётных мощностей при напряжениях U_i от измеренных значений мощностей S_i :

$$\sigma(Z_2, Z_1, Z_0) = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - (Z_2 U_i^2 + Z_1 U_i + Z_0))^2}{n} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где n – число измерений напряжения U_i , активной P_i и реактивной Q_i мощностей;

- производная от СХН по напряжению в точке математического ожидания с координатами по напряжению U_m , по активной P_m и реактивной Q_m мощностям должна быть равна регулируемому эффекту нагрузки $Z_1^{(\text{лин})}$, соответствующему коэффициенту наклона линейной СХН в именованных единицах для активной A_1 или реактивной B_1 мощности [7]:

$$2Z_2 U_m + Z_1 = Z_1^{(\text{лин})}; \quad (5)$$

- при напряжении $U_{\text{кр}}$, при котором происходит смена знака регулирующего эффекта нагрузки, производная от СХН по напряжению должна быть равна нулю:

$$2Z_2 \cdot U_{\text{кр}} + Z_1 = 0. \quad (6)$$

Рассматривая систему из уравнений (5) и (6) и переводя $Z_1^{(\text{лин})}$ в относительные единицы $z_1^{(\text{лин})}$

$\left(z_1^{(\text{лин})} = \frac{Z_1^{(\text{лин})} \cdot U_{\text{ном}}}{S_{\text{БАЗ}}^{(\text{лин})}} \right)$, коэффициенты Z_1 и Z_2 можно выразить через значение критического

напряжения $U_{кр}$, которое удобнее представлять в виде доли $u_{кр}$ от $U_{ном}$. Тогда уравнение (4) примет вид (7):

$$\sigma(u_{кр}, Z_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(S_i - \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)}}{2 \cdot U_{ном} \cdot (U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})} U_i^2 + \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)} \cdot u_{кр}}{(U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})} U_i - Z_0 \right)^2}{n} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $S_{БАЗ}^{(лин)}$ – базисная активная $P_{баз}^{(лин)}$ или реактивная $Q_{баз}^{(лин)}$ мощность для линейной модели СХН.

Регулирующий эффект нагрузки по активной или реактивной мощности $Z_{1i}^{(лин)}$ определяется путём проведения кластеризации измерений напряжения, активной и реактивной мощности. Кластеризация данных выполняется EM-алгоритмом для выделения гауссиан из смеси нормальных распределений [10, 11, 15, 16]. Для использования EM-алгоритма необходимо заранее обладать информацией о числе кластеров в измерениях, однако на практике такая информация, как правило, отсутствует. В связи с этим для определения числа кластеров в исходных данных используется алгоритм Сьюгер – Джеймса [17].

Для каждого найденного i -го кластера определяются регулирующие эффекты $Z_{1i}^{(лин)}$ путём преобразования параметров распределения кластеров для учёта влияния внешней электрической сети по выражению

$$Z_{1i}^{(лин)} = \frac{K'_{USi} - k_S D'_{Si}}{D'_{Ui} - k_S K'_{USi}}, \quad (8)$$

где D'_U – дисперсия измеренных напряжений; D'_S – дисперсия измеренных значений активной или реактивной мощности; K'_{US} – корреляционный момент между измеренными значениями напряжений и активной или реактивной мощности; k_S – коэффициент реакции сети, определяемый как отношение приращения напряжения в исследуемом узле нагрузки к приращению активной или реактивной мощности, вызвавшему изменение напряжения.

Отбор кластеров с целью фильтрации данных, ограничения дисперсии активной и реактивной мощностей, выделения наиболее значимых состояний нагрузки выполняется по условиям (9) на основании значений весов w_k и определителей ковариационных матриц $|\mathbf{K}_k|$ выбранных кластеров k :

$$w_k \geq w_{\max} - \sigma_w, \quad |\mathbf{K}_k| \geq |\mathbf{K}_{\min}| + \sigma_{|\mathbf{K}|}, \quad (9)$$

где w_{\max} , σ_w – значения максимального веса и среднеквадратичного отклонения весов найденных кластеров соответственно; $|\mathbf{K}_{\min}|$, $\sigma_{|\mathbf{K}|}$ – значения минимального определителя ковариационной матрицы и среднеквадратичного отклонения определителей ковариационных матриц найденных кластеров соответственно.

Итоговое значение $Z_1^{(лин)}$ определяется как средневзвешенное значение $Z_{1i}^{(лин)}$ отобранных кластеров.

При учёте реакции сети предполагается, что координаты U_m , P_m , Q_m остаются неизменными [7], а значит полученная полиномиальная модель СХН, должна проходить через эту точку, что соответствует выражению

$$S_m = \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)}}{2 \cdot U_{ном} \cdot (U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})} U_m^2 - \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)} \cdot u_{кр}}{(U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})} U_m + Z_0. \quad (10)$$

Соответствие коэффициентов полиномиальной модели СХН условиям (4)–(6) достигается за счёт оптимизационного расчёта коэффициентов с ограничением типа равенства (10). Целевой функцией для оптимизации является функция (7) от независимых переменных $u_{кр}$, и Z_0 . Независимая переменная Z_0 не выражена через независимую переменную $u_{кр}$, так как $u_{кр}$ для узла нагрузки физически не зависит от Z_0 . Данная зависимость проявляется только при статистической обработке.

Далее выполняется оптимизационный расчёт с ограничениями (11) методом Лагранжа [18] с итерационным расчётом по методу Ньютона [10, 12, 19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma(u_{кр}, Z_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(S_i - \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)}}{2 \cdot U_{ном} \cdot (U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})} U_i^2 + \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)} \cdot u_{кр}}{(U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})} U_i - Z_0 \right)^2}{n} \rightarrow \\ \rightarrow \min, \\ g(u_{кр}, Z_0) = S_m - \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)}}{2 \cdot U_{ном} \cdot (U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})} U_m^2 + \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)} \cdot u_{кр}}{(U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})} U_m - Z_0 = 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

1. Составляют оптимизационную функцию Лагранжа L (12) и находят $u_{кр}$ и Z_0 , при которых функция (12) принимает минимальное значение [18, 20]:

$$L(u_{кр}, Z_0, \lambda) = \sigma(u_{кр}, Z_0) + \lambda g(u_{кр}, Z_0), \quad (12)$$

где λ – множитель Лагранжа;

2. Решают систему уравнений (13) методом Ньютона (14), задавая вектор-столбец независимых переменных (15), как начальное приближение:

$$f(u_{кр}, Z_0, \lambda) = \begin{cases} \frac{\partial L(u_{кр}, Z_0, \lambda)}{\partial u_{кр}} = 0, \\ \frac{\partial L(u_{кр}, Z_0, \lambda)}{\partial Z_0} = 0, \\ \frac{\partial L(u_{кр}, Z_0, \lambda)}{\partial \lambda} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_j = \mathbf{X}_{j-1} - \mathbf{W}^{-1}(\mathbf{X}_{j-1}) f(\mathbf{X}_{j-1}), \quad (14)$$

где j – номер итерации; \mathbf{X} – вектор-столбец, соответствующий решению системы уравнений (11); $\mathbf{W}(\mathbf{X}_j)$ – матрица Гессе функции L [19, 21].

$$\mathbf{X}_0 = \begin{pmatrix} 0.5 \\ S_{баз}^{(лин)} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

3. Продолжают расчёт до выполнения соотношения

$$\|\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_{j-1}\| \leq \varepsilon, \quad (16)$$

где ε – максимально допустимая погрешность, либо число итераций j не превысит предварительно заданного максимального числа m итераций для исключения бесконечного расчёта.

4. Значения $u_{кр}$ и Z_0 используют для вычисления коэффициентов Z_2 и Z_1 в именованных единицах по выражению

$$Z_2 = \frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)}}{2 \cdot U_{ном} \cdot (U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})}, \quad Z_1 = -\frac{z_1^{(лин)} \cdot S_{БАЗ}^{(лин)} \cdot u_{кр}}{(U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})}. \quad (17)$$

5. Переводят коэффициенты Z_2, Z_1, Z_0 в относительные единицы z_2, z_1, z_0 по (18) для использования в программно-вычислительных комплексах для расчёта электрических режимов:

$$z_2 = Z_2 \frac{U_{БАЗ}^2}{S_{БАЗ}}, \quad z_1 = Z_1 \frac{U_{БАЗ}}{S_{БАЗ}}, \quad z_0 = \frac{Z_0}{S_{БАЗ}}, \quad (18)$$

где $S_{БАЗ}$ – базовые значения активной или реактивной мощности, соответствующие активной или реактивной мощности нагрузки при $U = U_{БАЗ}$, и определяемые по формуле

$$S_{\text{БАЗ}} = Z_2 U_{\text{БАЗ}}^2 + Z_1 U_{\text{БАЗ}} + Z_0. \quad (19)$$

В результате получают полиномиальную модель СХН по напряжению из линейной модели.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Методика протестирована на массивах измерений, полученных для крупного промышленного потребителя. Измерения U_i , P_i и Q_i , приведены на рис. 1а, 1б.

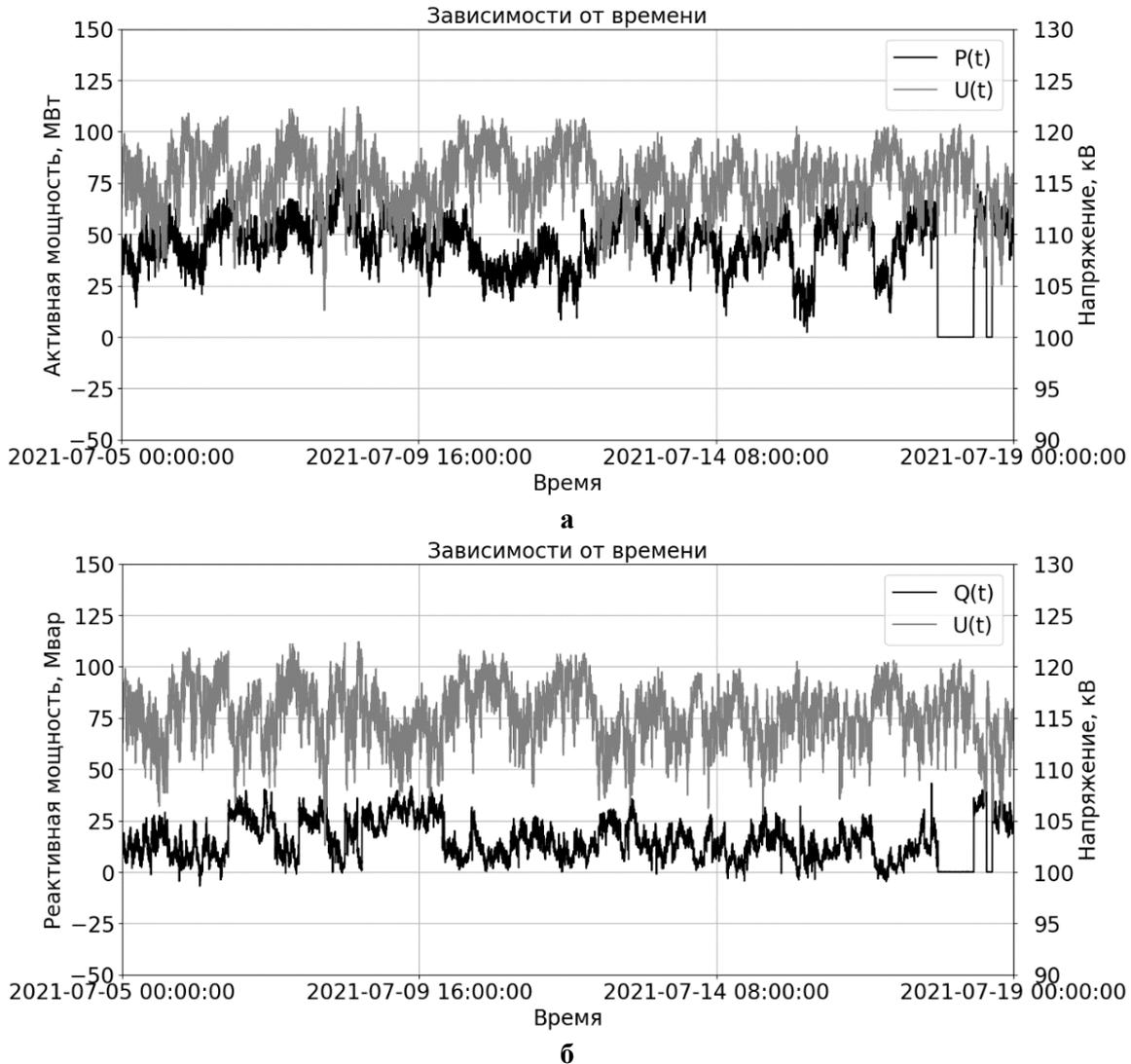


Рис. 1. Графики зависимостей: а – активной мощности от времени; б – реактивной мощности от времени / Fig. 1. Dependence graphs: a – active power on time; b – reactive power on time

Измерения U_i , P_i и Q_i были приведены к общей оси времени и далее кластеризованы EM-алгоритмом для выделения гауссиан из смеси нормальных распределений. Число кластеров (гауссиан) определено с помощью алгоритма Сьюгер – Джеймса. Результаты кластеризации приведены на рис. 2.

Для каждого найденного кластера выполнены: преобразования параметров распределения кластеров для учёта влияния внешней электрической сети; процедура отбора кластеров с целью фильтрации данных; ограничения дисперсии активной и реактивной мощностей; выделения наиболее значимых состояний нагрузки. После выполненных преобразований осуществляется отбор значимых кластеров по условиям (9) на основании значений весов W_k и определителей ковариационных матриц $|K_k|$ выбранных кластеров k .

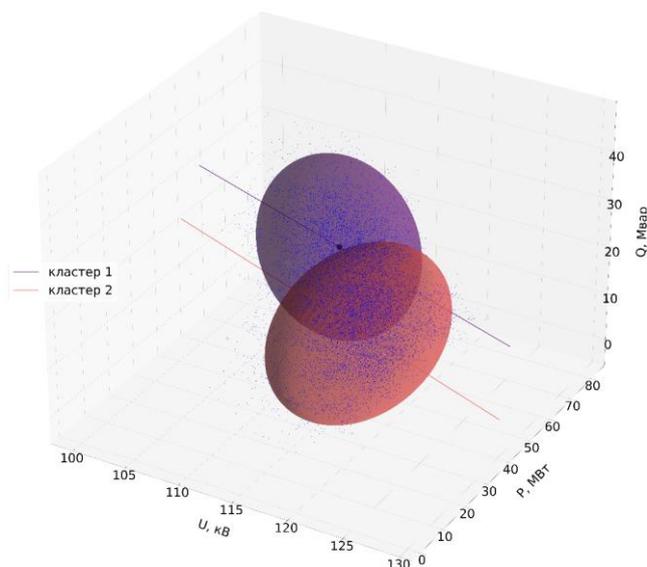


Рис. 2. Результаты кластеризации EM-алгоритмом / Fig. 2. EM-algorithm clusterization results

На рис. 3 представлен результат отбора значимых кластеров и преобразования параметров распределения для линейной модели СХН по напряжению, учитывающей влияние внешней электрической сети по активной $k_P = -0,045$ кВт/МВт и реактивной $k_Q = -0,146$ кВт/Мвар мощностям.

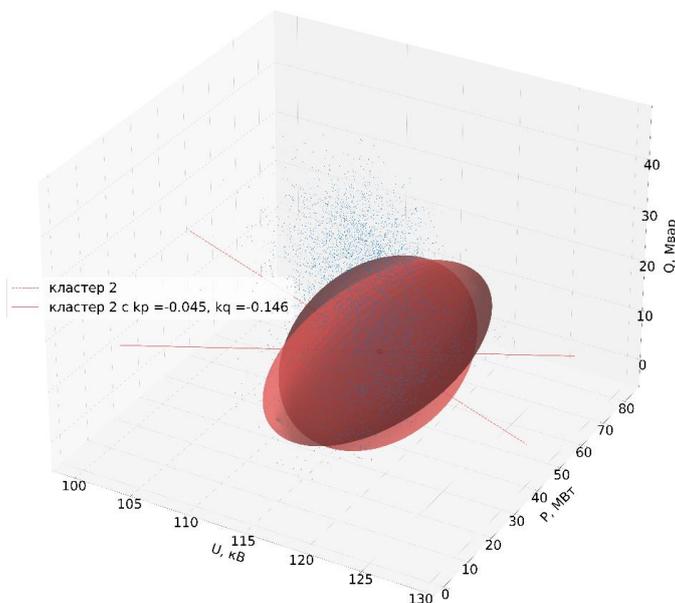


Рис. 3. Результаты отбора значимых кластеров и преобразования параметров распределения / Fig. 3. Results of important clusters selection and distribution parameters transformation

По результатам кластеризации и преобразования параметров распределения и отбора наиболее значимых кластеров вычислены параметры линейных моделей СХН по напряжению для активной и реактивной мощностей как средневзвешенные значения этих параметров каждого отобранного кластера. Для представленных на рис. 1 измерений значения регулирующих эффектов в именованных единицах, а также базисные значения активной и реактивной мощностей следующие:

$$A_1 = 1,786 \text{ МВт/кВ}; B_1 = -0,168 \text{ Мвар/кВ}; P_{\text{БАЗ}}^{(\text{лин})} = 32,742 \text{ МВт}; Q_{\text{БАЗ}}^{(\text{лин})} = 11,195 \text{ Мвар}.$$

Координаты точки математического ожидания вычислены как средневзвешенные значения координат центров рассеяния отобранных кластеров. Для отобранных кластеров (рис. 3), координаты точки математического ожидания:

$$U_m = 116,504 \text{ кВ}; P_m = 44,355 \text{ МВт}; Q_m = 10,101 \text{ Мвар}.$$

Результаты оптимизационного расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Результаты расчёта / Calculation results

A_1 (лин), МВт/кВ	a_1 (лин), о.е.	$P_{БАЗ}$ (лин), МВт	P_m , МВт	U_m , кВ	A_2 , МВт/ кВ ²	a_2 , о.е.	A_1 , МВт/ кВ	a_1 , о.е.	A_0 , МВт	a_0 , о.е.	$P_{БАЗ}$, МВт	
1,786	5,999	32,742	44,355		B_1 (лин) Мвар/ кВ	0,023	8,119	-3,483	-11,370	143,241	4,251	33,699
B_1 (лин) Мвар/ кВ	b_1 (лин), о.е.	$Q_{БАЗ}$ (лин), Мвар	Q_m , Мвар			B_2 , Мвар/ кВ ²	b_2 , о.е.	B_1 , Мвар/ кВ	b_1 , о.е.	B_0 , Мвар	b_0 , о.е.	$Q_{БАЗ}$, Мвар
-0,168	-1,654	11,195	10,101	-0,001	-0,809	0,006	0,056	19,573	1,753	11,164		

Для проверки корректности полученной полиномиальной модели СХН по напряжению в программно-вычислительном комплексе для расчёта электрических режимов выполнено моделирование электрических режимов при последовательном изменении номинальных значений активной и реактивной мощностей нагрузки исследуемого узла с фиксацией расчётных значений мощностей узла нагрузки, а также выполнено сравнение с типовой моделью СХН по напряжению, коэффициенты которой приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Типовая модель СХН по напряжению / Reference model of the SLC by voltage

a_2 , о.е.	a_1 , о.е.	a_0 , о.е.	b_2 , о.е.	b_1 , о.е.	b_0 , о.е.
0,470	-0,300	0,830	4,300	-7,000	3,700

Расчёт выполнялся на полной расчётной модели ОЭС Сибири. В исследуемом узле нагрузки исходно задана типовая СХН. Диапазоны изменения номинальных значений активной и реактивной мощностей соответствовали диапазонам изменения активной и реактивной мощностей, измеренным при проведении пассивного эксперимента: для активной мощности – от 0 до 105,70 МВт с шагом 5,285 МВт; для реактивной мощности – от 0 до 41,58 МВт с шагом 2,079 МВт.

Результаты расчёта электрических режимов с определенной по представленной методике полиномиальной моделью СХН по напряжению и типовой моделью СХН, представлены на рис. 4.

При использовании предлагаемой методики дисперсия исходных измерений относительно расчётных точек составила:

- для расчётной СХН – 10,412 МВт² по активной мощности, 7,212 Мвар² по реактивной мощности;
- для типовой СХН – 10,579 МВт² по активной мощности и 23,739 Мвар² по реактивной мощности.

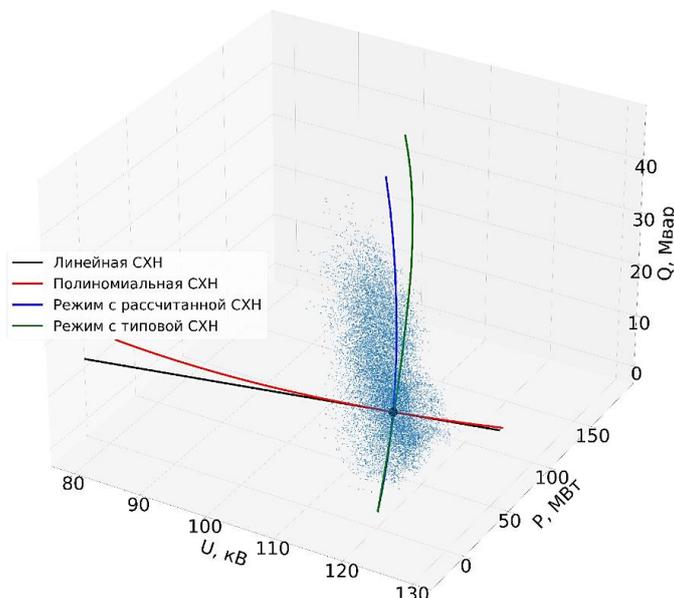


Рис. 4. Результаты расчёта электрических режимов / Fig. 4. Regime calculation results

Заключение / Conclusion. Определенная с помощью предлагаемой методики полиномиальная модель СХН по напряжению обеспечивает более точное моделирование нагрузки, чем типовая модель СХН. Это видно по приведённым значениям дисперсии исходных измерений относительно расчётных точек, а коэффициенты модели могут быть использованы в комплексах для расчёта электрических режимов.

Помимо этого, предлагаемая методика позволяет сократить размерность решаемой задачи и число операций для получения итогового результата за счёт исключения этапа коррекции базисной мощности.

Результаты, представленные в настоящей статье, будут использованы для сравнения с результатами, полученными при реализации метода оптимизации Левенберга – Марквардта вместо метода Ньютона, так как метод Левенберга – Марквардта считается менее зависимым от начального приближения, а также при совершенствовании методики выделения кластеров в измерениях мощности, изменения которых обусловлены именно изменением напряжения, а не какими-либо другими факторами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Milanovic J. V., Yamashita K., Martinez Villanueva S., Djokic S. Z., Korunovic L. M. International industry practice on power system load modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013. No. 28 (3). P. 3038–3046.
2. Dmitriev S. A., Semenenko S. I., Suvorov A. A. Complex load bus static load characteristics determination using passive experiment method // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018 / Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2018. Vol. 2018. April. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ACED.2018.8341711>.
3. Тавлинцев А. С., Суворов А. А. Статистически равновесные состояния нагрузки в задаче идентификации статических характеристик нагрузки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 23–28. <https://doi.org/10.14529/power170203>.
4. Chen F., Liu H.-T., Huang Z., Zhang X.-J. Probabilistic load model based on improved k-means clustering algorithm. *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi // Power System Protection and Control*. 2013. Vol. 41. P. 128–133.
5. Karpio K., Łukasiewicz P., Nafkha R. Regression Technique for Electricity Load Modeling and Outlined Data Points Explanation // *Advances in Intelligent Systems and Computing: International Multi-Conference on Advanced Computer Systems, ACS*. 2018. Vol. 889. P. 56–67.
6. Коновалов Ю. С., Кугелевичус И. Б. О возможности определения статических характеристик нагрузки методами математической статистики // *Электричество*. 1968. № 3. С. 11–13.
7. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е. Об определении характеристик нагрузки по напряжению методом пассивного эксперимента // *Электричество*. 1972. № 2. С. 21–24.
8. Hossan M. S., Mesbah Maruf H. M., Chowdhury B. Comparison of the ZIP load model and the exponential load model for CVR factor evaluation // *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274490>.
9. Ram S., Daram S., Venkataramu P. S., Nagaraj M. Analysis of exponential and polynomial load models using Newton-Raphson method with hybrid power flow controller // *International Journal of Control and Automation*. 2018. Vol. 11. No. 11. P. 43–56. <https://doi.org/10.14257/ijca.2018.11.11.04>.
10. Pankratov A. V., Batseva N. L., Polyakova E. S., Tavlintsev A. S., Lapatin I. L., Lipnitskiy I. Y. Application of expectation maximization algorithm for measurement-based power system load modeling // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON – April 2019)*. Tomsk, 2019. P. 1–5.
11. Тавлинцев А. С. Развитие методов идентификации статических характеристик комплексного узла нагрузки: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 172 с.: ил.
12. Rodriguez-Garcia L., Perez-Londoño S., Mora-Florez J. Measurement-based exponential recovery load model: Development and validation // *DYNA*. 2015. Vol. 82. P. 131–140.
13. Воронцов К. В., Потапенко А. А. Модификация EM-алгоритма для вероятностного тематического моделирования // *Машинное обучение и анализ данных*. 2013. Т. 1. № 6. С. 657–686.
14. Бацева Н. Л., Жуйков А. К. Метод обработки измерений в задаче идентификации полиномиальных статических характеристик нагрузки по напряжению // XXVI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM 2023) 24–26 мая 2023. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. Т. 1. С. 20–24.
15. Панкратов А. В., Бацева Н. Л., Жуйков А. К., Шувалова А. А., Кондрашов М. А. Методика обработки телеизмерений оперативно-информационного комплекса при определении статических характеристик нагрузки методом активного эксперимента // *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2021. № 39. С. 5–33.
16. Бацева Н. Л., Панкратов А. В., Жуйков А. К. Программное обеспечение для определения модели нагрузки по массивам измерений пассивного эксперимента // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2022. Т. 11. № 3 (59). С. 51–56.

17. Sugar C. A., James G. M. Finding the Number of Clusters in a Dataset // Journal of the American Statistical Association. 2003. No. 98. P. 750–763.
18. Trench W. F. The Method of Lagrange Multipliers. Research Gate. Texas, USA: Book, 2012. 31 p.
19. Givens G. H., Hoeting J. A. Computational Statistics. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. P. 24–58.
20. Hansbo P., Lovadina C., Perugia I., Sangalli G. A. Lagrange multiplier method for the finite element solution of elliptic interface problems using non-matching meshes // Math. 2005. No. 100. P. 91–115.
21. Wang Y., Solomon J. M. Intrinsic and extrinsic operators for shape analysis // Handbook of Numerical Analysis. 2019. Vol. 20. P. 41–115.

REFERENCES

1. Milanovic JV, Yamashita K, Martinez Villanueva S, Djokic SZ, Korunovic LM. International industry practice on power system load modeling. IEEE Transactions on Power Systems. 2013;28(3):3038-3046.
2. Dmitriev SA, Semenenko SI, Suvorov AA. Complex load bus static load characteristics determination using passive experiment method. 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2018;2018:1-6. <https://doi.org/10.1109/ACED.2018.8341711>.
3. Tavlintsev AS, Suvorov AA. Statistically equilibrium states of load in the problem of static load characteristics identification. Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2017;17(2):23-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power170203>.
4. Chen F, Liu H-T, Huang Z, Zhang X-J. Probabilistic load model based on improved k-means clustering algorithm. Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi. Power System Protection and Control. 2013;41:128-133.
5. Karpio K, Lukasiewicz P, Nafkha R. Regression Technique for Electricity Load Modeling and Outlined Data Points Explanation. International Multi-Conference on Advanced Computer Systems, ACS 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018;889:56-67.
6. Konovalov YS, Kugelevichus IB. On the Possibility of Determining the Static Characteristics of the Load by Methods of Mathematical Statistics. Elektrichestvo = Electricity. 1968;3:11-13. (In Russ.).
7. Gurevich YE, Libova LE. On the determination of the voltage load characteristics by the method of passive experiment. Elektrichestvo = Electricity. 1972;2:21-24. (In Russ.).
8. Hossan MS, Mesbah Maruf HM, Chowdhury B. Comparison of the ZIP load model and the exponential load model for CVR factor evaluation. 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting; 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274490>.
9. Ram S, Daram S, Venkataramu PS, Nagaraj M. Analysis of exponential and polynomial load models using Newton-Raphson method with hybrid power flow controller. International Journal of Control and Automation. 2018;11(11):43-56. <https://doi.org/10.14257/ijca.2018.11.11.04>.
10. Pankratov AV, Batseva NL, Polyakova ES, Tavlintsev AS, Lapatin IL, Lipnitskiy IY. Application of expectation maximization algorithm for measurement-based power system load modeling. In 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON April 2019). Tomsk; 2019. P. 1–5.
11. Tavlintsev AS. Development of methods of static characteristics of complex load node identification: dissertation ... Cand. Sci. (Technology). Ekaterinburg, 2018. 172 p.: il.
12. Rodriguez-Garcia L, Perez-Londoño S, Mora-Florez J. Measurement-based exponential recovery load model: Development and validation. DYNA. 2015;82:131-140.
13. Vorontsov KV, Potapenko AA. Modifications of the EM-algorithm for probabilistic thematic modeling. Mashinnoe obuchenie i analiz dannyh = Machine Learning and Data Analysis. 2013;1(6):657-686. (In Russ.).
14. Batseva NL, Zhuykov AK. Method of the experiment data processing for the polynomial static load characteristics identification. XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2023) 24–26 May 2023. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2023. Vol. 1. P. 20–24.
15. Pankratov AV, Batseva NL, Zhuykov AK, Shuvalova AA, Kondrashov MA. Processing technique of telemetry from an operative-information complex for the identification of static load characteristics by an active experiment. Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravleniya = Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems. 2021;39:5-33. (In Russ.).
16. Batseva NL, Pankratov AV, Zhuykov AK. Software for the identification of a load model by arrays, measured by passive experiment. XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus. 2022;11(3(59)):51-56. (In Russ.).
17. Sugar CA, James GM. Finding the Number of Clusters in a Dataset. Journal of the American Statistical Association. 2003;98:750-763.
18. Trench WF. The Method of Lagrange Multipliers. Research Gate. Texas, USA: Book; 2012. 31 p.
19. Givens GH, Hoeting JA. Computational Statistics. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2013. P. 24-58.

20. Hansbo P, Lovadina C, Perugia I, Sangalli GA. Lagrange multiplier method for the finite element solution of elliptic interface problems using non-matching meshes. *Math.* 2005;100:91-115.
21. Wang Y, Solomon JM. Intrinsic and extrinsic operators for shape analysis. *Handbook of Numerical Analysis.* 2019;20:41-115.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Наталья Ленмировна Бацева – кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Scopus ID: 56486150000, Researcher ID: AAI-6578-2020

Александр Константинович Жуйков – аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета, Scopus ID: 57224316094, Researcher ID: JFB-0245-2023

ВКЛАД АВТОРОВ

Наталья Ленмировна Бацева

Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных, разработка концепции методики обработки данных.

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

Александр Константинович Жуйков

Проведение исследования – алгоритмизация и методики обработки данных.

Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia L. Batseva – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering of the Engineering School of Energy of the National Research Tomsk Polytechnic University, Scopus ID: 56486150000, Researcher ID: AAI-6578-2020

Alexander K. Zhuykov – Postgraduate Student of National Research Tomsk Polytechnic University, Scopus ID: 57224316094, Researcher ID: JFB-0245-2023

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Natalia L. Batseva

Conducting research – data collection, analysis and interpretation, conceptualization of the processing technique.

Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.

Alexander K. Zhuykov

Conducting research – algorithmization and practical evaluation of the processing technique.

Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.