

## 2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 620.9

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.2.2>

## МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ СНИЖЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ, ВЫЗВАННЫХ НЕСИММЕТРИЕЙ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬЮ НАГРУЗКИ

Александр Александрович Пестерев<sup>1\*</sup>, Сергей Сергеевич Костинский<sup>2</sup>,  
Нури Дазмирович Наракидзе<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова (д. 132, ул. Просвещения, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация)

<sup>1</sup> [saniki26@yandex.ru](mailto:saniki26@yandex.ru); <https://orcid.org/0009-0001-1683-7521>

<sup>2</sup> [mirovingen1987@mail.ru](mailto:mirovingen1987@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>

<sup>3</sup> [ndaz@mail.ru](mailto:ndaz@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-3760-4003>

\* Автор, ответственный за переписку

**Аннотация. Введение.** Рост количества и установленной мощности электроприемников, имеющих нелинейный и несимметричный характер нагрузки, в современных системах электроснабжения ведет к ухудшению качества электроэнергии и появлению дополнительных потерь мощности. В статье авторы решают актуальную задачу по распределению однофазных электроприемников в системе электроснабжения офисного здания для оценки суммарной доли дополнительных потерь вследствие несимметрии и несинусоидальности в общей структуре суммарных потерь в распределительной сети 0,4 кВ. **Цель.** Разработать методику на основе алгоритма оптимального распределения по фазам линий L1, L2, L3 системы электроснабжения однофазных электроприемников в динамическом режиме их работы при помощи генетического алгоритма для минимизации дополнительных потерь в оборудовании систем электроснабжения, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью. **Материалы и методы.** Был разработан цифровой измеритель параметров однофазных электроприемников для сбора исходных данных с офисных электроприемников в виде массивов с мгновенными значениями напряжения питания и силы тока. В качестве целевой функции в разработанном алгоритме используются показательные величины потерь в несимметричном режиме над потерями в симметричном режиме и дополнительных потерь от высших гармонических составляющих. **Результаты и обсуждение.** Представлены результаты оценки дополнительных потерь, рассчитанные с помощью предложенной методики, для оптимального распределения однофазных электроприемников офисного здания, учитывая их технологический режим работы в течение рабочего дня. Оценена эффективность применения разработанной методики на этапе проектирования систем электроснабжения по сравнению с традиционно используемым подходом путем сравнения величин дополнительных потерь электроэнергии при распределении однофазных электроприемников в статическом режиме (эффективнее на 39,9 %) и в динамическом режиме (эффективнее на 77,1 %). **Заключение.** Разработанная методика позволила получить принципиально новое техническое решение, реализуемое как для действующих, так и для вновь проектируемых систем электроснабжения, позволяющее минимизировать потери в оборудовании систем электроснабжения, за счет снижения дополнительных потерь, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью.

**Ключевые слова:** несимметрия, несинусоидальность, однофазные нелинейные электроприемники, генетический алгоритм, минимизация дополнительных потерь, распределение электроприемников по фазам

**Для цитирования:** Пестерев А. А. Методика оптимального распределения однофазных электроприемников в системах электроснабжения по критерию снижения дополнительных потерь, вызванных несимметрией и несинусоидальностью нагрузки / А. А. Пестерев, С. С. Костинский, Н. Д. Наракидзе // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 2 (107). С. 22–35. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.2.2>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.02.2025;  
одобрена после рецензирования 25.03.2025;  
принята к публикации 31.03.2025.

## Research article

# METHODOLOGY OF OPTIMAL DISTRIBUTION OF SINGLE-PHASE ELECTRIC CONSUMERS IN POWER SUPPLY SYSTEMS BY THE CRITERION OF REDUCTION OF ADDITIONAL LOSSES CAUSED BY LOAD ASYMMETRY AND NON-SINUSOIDALITY

Aleksandr A. Pesterev<sup>1\*</sup>, Sergey S. Kostinskiy<sup>2</sup>, Nuri D. Narakidze<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov (132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation)

<sup>1</sup> saniki26@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1683-7521>

<sup>2</sup> mirovingen1987@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>

<sup>3</sup> ndaz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3760-4003>

\* Corresponding author

**Abstract. Introduction.** The increase in the number and installed capacity of loads with nonlinear and unbalanced characteristics in modern power supply systems leads to deterioration in power quality and additional power losses. In this article, the authors address the pertinent task of distributing single-phase loads within the electrical system of an office building to assess the total share of additional losses resulting from asymmetry and non-sinusoidal waveforms in the overall structure of losses in the 0.4 kV distribution network. **Goal.** The study aims to develop a technique based on an algorithm for optimal distribution of single-phase loads over phases L1, L2, and L3 of the power supply system during their dynamic operation using a genetic algorithm to minimize additional losses in electrical equipment caused by asymmetry and non-sinusoidal waveforms. **Materials and methods.** A digital parameter meter for single-phase electrical receivers has been developed to collect initial data from office electrical receivers in the form of arrays with instantaneous values of supply voltage and current. In the developed algorithm, the target function utilizes exponential loss values in the unbalanced mode over losses in the balanced mode, as well as additional losses due to higher harmonic components. **Results and discussion.** The results of the assessment of additional losses calculated using the proposed methodology are presented for the optimal distribution of single-phase loads in an office building, taking into account their operational modes throughout the working day. The efficiency of the developed methodology application at the stage of power supply systems design with the traditionally used approach has been estimated by comparing the values of additional power losses during the distribution of single-phase electric consumers in static mode (39,9 % more efficient) and in dynamic mode (77,1 % more efficient). **Conclusion.** The developed methodology enabled the creation of a fundamentally new technical solution that can be implemented in both existing and newly designed power supply systems, allowing for minimization of losses in electrical equipment by reducing additional losses caused by asymmetry and non-sinusoidality.

**Keywords:** asymmetry, non-sinusoidality, single-phase nonlinear loads, genetic algorithm, minimization of additional losses, phase allocation of loads

**For citation:** Pesterev AA, Kostinskiy SS, Narakidze ND. Methodology of optimal distribution of single-phase electric consumers in power supply systems by the criterion of reduction of additional losses caused by load asymmetry and non-sinusoidality. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;2(107):22-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.2.2>

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

The article was submitted 26.02.2025;

approved after reviewing 25.03.2025;

accepted for publication 31.03.2025.

**Введение / Introduction.** Увеличение в современных системах электроснабжения (СЭС) мощности и числа однофазных электроприемников, имеющих нелинейный характер нагрузки, приводит к снижению показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Это обусловлено преобразованием нелинейными электроприемниками части мощности синусоидального тока частотой 50 Гц в мощность гармонических составляющих, возвращаемых обратно в сеть, что приводит к выходу за пределы величин ПКЭ, регламентируемых в Российской Федерации межгосударственным стандартом ГОСТ 32144-2013 [1–3]. К таким нормируемым ПКЭ в случае нелинейной и несимметричной нагрузки относятся: коэффициент несимметрии напряжений по обратной K2U и нулевой K0U последовательностям, а также показатель эмиссии гармонических составляющих напряжения THDU.

Отклонение значений, перечисленных ПКЭ, от норм, установленных ГОСТ 32144-2013, может привести к ряду негативных последствий, способствующих изменению эксплуатационных характеристик оборудования и появлению дополнительных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях [1, 4].

Стоит отметить, что в РФ ГОСТом нормируются только ПКЭ, связанные с напряжением, в то время как за рубежом применяют стандарты IEEE Std 519-2014 и Brown Book™ IEEE STD 399™ 1997, нормирующие показатели эмиссии гармонических составляющих тока, с целью обеспечения потребителей электрической энергией (ЭЭ) надлежащего качества с учетом наличия высших гармонических составляющих (ВГ) тока и напряжения как на стадии проектирования СЭС, так и на стадии ее эксплуатации [5].

Для оценки величины потерь активной мощности в распределительных сетях при несимметричном режиме над потерями в симметричном режиме используют выражение [6]:

$$\delta P_q = \frac{\Delta P_q}{\Delta P_{qc}} = K_q^2 (1 + \varepsilon_{iq}^2 + \varepsilon_{iq}^0 \cdot \xi_q), \quad (1)$$

$\xi_q = 1 + 3 \frac{r_{0q}}{r_q}$ ,  $\xi_q = 1 + 3 \frac{r_{0q}}{r_q}$ , где  $\Delta P_q$  – потери мощности в несимметричном режиме;

$\Delta P_{qc}$  – потери мощности в симметричном режиме;  $K_q = \frac{i'_q}{i'_{qc}}$  – отношение тока прямой последова-

тельности к току в симметричном режиме;  $\varepsilon_{iq}'' = \frac{i''_q}{i'_{qc}}$  – коэффициент по обратной последователь-

ности тока;  $\varepsilon_{iq}^0 = \frac{i_q^0}{i'_q}$  – коэффициент по нулевой последовательности тока;  $i''_q$ ,  $i'_q$  и  $i_q^0$  – токи об-

ратной, прямой и нулевой последовательностей;

$$\xi_q = 1 + 3 \frac{r_{0q}}{r_q},$$

где  $r_{0q}$ ,  $r_q$  – сопротивления нулевого рабочего и фазного проводников.

Для оценки влияния несинусоидальной нагрузки на величину активных потерь мощности в трехфазных системах электроснабжения используется выражение [7]

$$\Delta P_v = 3 \cdot I_v^2 \cdot R, \quad (2)$$

где  $I_v$  – ток  $v$ -той гармонической составляющей;  $R$  – эквивалентное активное сопротивление сети.

Одним из способов снижения дополнительных потерь электроэнергии в распределительных сетях является борьба с несимметрией посредством равномерного распределения нагрузок между фазами. Поскольку электроприемники, имеющие нелинейный характер нагрузки, оказывают влияние на спектральный состав тока и напряжения, то, в отличие от случаев с синусоидальной нагрузкой, необходимо использовать явление взаимной компенсации токов ВГ или применять фильтры ВГ, что требует значительных капитальных вложений [8].

В работе [9] предложен метод внутреннего симметрирования для поиска варианта распределения мощных однофазных электропотребителей. В силу симметрии составляющих токов прямой (обратной) последовательности авторы оперируют величинами токов последовательности как геометрической суммой ее активных и реактивных составляющих. Поскольку значение прямой последовательности не зависит от способа распределения однофазных электропотребителей, то для решения поставленной задачи определяется минимально возможное значение обратной последовательности и соответствующая ему схема распределения однофазных электропотребителей. Подобная задача поиска оптимального распределения представлена в [10], где для решения используется модифицированный алгоритм симплекс-метода. За критерий эффективности симметрирования принимается модуль тока обратной последовательности, минимальное значение которого получается добиться за счет формальной математической модели, где выполняется на-

хождение минимума модуля тока обратной последовательности путем рационального включения однофазных электропотребителей. Задачу поиска оптимального распределения электропотребителей в указанных ранее методах можно упростить, если предварительно выполнить классификацию и сокращение элементов множества вариантов включения однофазных электропотребителей на основе его теоретико-группового представления и преобразования [11].

В зарубежных научных литературных источниках проблема равномерного распределения однофазных электроприемников по фазам рассматривалась во многих исследованиях, в каждом из которых использовались различные подходы и методики, такие как алгоритм глобальной оптимизации имитации отжига (Simulated Annealing, SA) [12], генетический алгоритм поиска (Genetic Algorithm, GA) [13], метод Табу-поиск (Tabu Search, TS) [14]. В работе [15] предложен метод для минимизации потерь за счёт балансировки фазовой нагрузки и реконфигурации распределительной сети с помощью канонического GA для балансировки фазовой нагрузки и GA на основе связующего дерева для реконфигурации сети. В работе [16] приведен практический подход к балансировке нагрузки четырехпроводной распределительной сети путем оптимальной перегруппировки однофазных электроприемников с использованием дискретного GA, для снижения потерь мощности и несимметрии в распределительной сети. В работе [17] представлены результаты тематического исследования, в ней приведено сравнение производительности GA и алгоритма роя частиц (PSO) для решения оптимизационной задачи балансировки фазовой нагрузки. Алгоритмы протестированы на реальной низковольтной 3-фазной 4-проводной распределительной сети, снабжающей потребителей в сельской местности. При этом отмечено, что GA превосходит PSO в поиске решения по балансировке, по критерию минимизации дополнительных потерь активной мощности на интервале 24 часов.

Отмеченные результаты показывают, что в большинстве случаев при решении задачи оптимального распределения электропотребителей применяется классический GA. Генетический алгоритм – это популяционный эвристический метод, способный параллельно исследовать многомерные пространства поиска [18]. Его механизм основан на эволюционном подходе, вдохновленном генетикой и естественным отбором, который предполагает, что популяция особей одного вида становится лучше приспособленной к окружающей среде в результате непрерывной эволюции. Потомство наследует от своих родителей комбинации признаков, которые делают их более или менее приспособленными к выживанию. Лучше приспособленные особи имеют наибольшие шансы на выживание, согласно принципу «выживает сильнейший».

Однако стоит отметить, что приведенные выше исследования для решения задачи оптимального распределения однофазных электроприемников не позволяют найти оптимального решения, которое бы позволило минимизировать влияние электроприемников, имеющих нелинейный и несимметричный характер нагрузки на потери в оборудовании систем электроснабжения, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью, что является задачей, требующей дальнейшего исследования с применением GA. Также стоит отметить, что нагрузка, создаваемая каждым однофазным электроприемником, является переменной величиной, зависящей от технического процесса эксплуатации электроприемника, вследствие чего необходимо оценивать влияние электроприемников на сеть с учетом их работы в динамике [19], так как даже изначально симметрично распределенная нагрузка в проектируемой распределительной сети может прийти к несимметрии токов и напряжений в ходе ее эксплуатации.

Научная значимость результатов в представленном исследовании заключается в определении оптимального распределения по фазам L1, L2, L3 системы электроснабжения однофазных электроприемников в динамическом режиме их работы при помощи GA по критерию минимизации потерь в оборудовании систем электроснабжения, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью. Исследования проводились с почасовой разбивкой подключения различных офисных однофазных электроприемников к сети, согласно данным о режиме их работы в офисном здании.

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** Для получения исходных данных, необходимых для реализации предлагаемой методики, были разработаны аппаратные и программные средства: цифровой измеритель параметров однофазных электроприемников (рисунок 1), прошедший юстировку в ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Ростовской области» и программа для управления этим цифровым измерителем, позволяющая выполнить запись массивов мгновенных значений напряжения питания и силы тока, потребляемой однофазными электроприемниками, синхронизированных по переходу через ноль значения напряжения (номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688668 от 29.11.2024 г.)



Рис. 1. Цифровой измеритель параметров однофазных электроприемников: 1 – кейс для транспортировки измерителя; 2 – соединительные провода для подключения к измерительной цепи напряжения; 3 – цифровой измеритель параметров однофазных электроприемников; 4 – щупы типа «крокодил» для подключения к измерительной цепи напряжения; 5 – токовая клеща для подключения к измерительной цепи тока; 6 – щупы типа «штырь» для подключения к измерительной цепи напряжения; 7 – кабель питания; 8 – блок питания от сети; 9 – блок питания от аккумуляторной батареи для работы в автономном режиме / Fig. 1. Digital meter for measuring parameters of single-phase electric consumers: 1 – case for transporting the meter; 2 – connection wires for connection to the voltage measuring circuit; 3 – digital meter for measuring parameters of single-phase electric consumers; 4 – alligator probes for connection to the voltage measuring circuit; 5 – current clamp for connection to a current measuring circuit; 6 – pin type probes for connection to the voltage measuring circuit; 7 – power cable; 8 – mains power supply; 9 – battery power supply for autonomous operation.

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

Разработанный цифровой измеритель позволил на основе измерений параметров работы реальных однофазных электроприемников в офисном здании получить массивы данных с мгновенными значениями напряжения питания и силы тока. При этом мгновенные значения передавались для отображения на экран цифрового измерителя и записывались в файл на SD-карту посредством разработанной программы для ЭВМ № 2024688668. Количество измеренных мгновенных значений силы тока или напряжения за один период составило 102 значения, что соответствует теореме Котельникова для значения верхней частоты 2000 Гц (40-я гармоническая составляющая напряжения переменного тока и силы тока) и позволяет выполнить дискретный сдвиг на  $1/3$  периода для определения симметричных составляющих токов обратной  $I_2$ , прямой  $I_1$ , и нулевой  $I_0$  последовательностей, согласно методу, основанному на обработке синхронизированных мгновенных измерений фазных напряжений или токов [20], медианное значение погрешности которого для расчета симметричных составляющих в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке, не превышает 0,16 % [21].

Формулы (3) и (4), являющиеся целевыми функциями в программе для ЭВМ № 2024687149 для расчета дополнительных потерь мощности при несимметрично-несинусоидальном режиме работы сети, соответствуют формулам (1) и (2) и имеют вид

$$\Delta P_{\text{несим}} = \left[ K_q^2 \cdot \left( 1 + K_2^2 + K_0^2 \cdot \left( 1 + 3 \frac{r_0}{r_\phi} \right) \right) - 1 \right] \cdot \left( I_{\text{сим}}^2 \cdot r_\phi \cdot 3 \right),$$

где  $K_q = \frac{i_1}{I_{\text{сим}}}$  – отношение тока прямой последовательности к току в симметричном режиме;  $K_2 = \frac{i_2}{I_1}$  – коэффициент по обратной последовательности тока;  $K_0 = \frac{i_0}{I_1}$  – коэффициент по нулевой последовательности тока;  $r_0$ ,  $r_\phi$  – сопротивления нулевого рабочего и фазного проводников.

$$\Delta P_{\text{несим}} = \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \cdot R, \quad (4)$$

где  $I_n$  – ток  $n$ -ой гармонической составляющей.)

С учетом формул (3) и (4) итоговым решением поставленной задачи является получение комбинации из общего количества электроприемников путем распределения их по фазам линий  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , соответствующая минимально возможному значению дополнительных потерь мощности от несимметричного и несинусоидального режимов на основе массивов мгновенных значений силы токов однофазных электроприемников, измеренных за один период, аналогично алгоритму, приведенному в работе [22]. Однако в качестве целевой функции необходимо использовать не коэффициент неравномерности загрузки фаз  $K_{\text{нр}}$ , а совокупность выражений (3) и (4).

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** Рассмотрим результаты работы разработанной программы на примере распределения электроприемников одного из этажей в офисном здании. На этаже расположен ряд электроприемников: ноутбуки, ПК, мониторы, ЖК-телевизор, холодильник, микроволновая печь, МФУ и линии освещения (светодиодные светильники). В [23] авторами в ходе исследований было выявлено, что в случае группового подключения ПК, ноутбуков и другой оргтехники коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей выходят за пределы значений, установленных в ГОСТ 32144-2013. А в исследовании [24] было выявлено, что при подключении большого количества нелинейных бытовых электроприемников происходит увеличение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. Для более детальной оценки долевого вклада работы каждого электроприемника в несимметрию и несинусоидальность системы электроснабжения в таблице 1 приведены действующие значения силы потребляемого тока  $I_d$  и суммарный коэффициент гармонических искажений тока  $\text{THD}_I$ .

Для исследования работы электроприемников, приведенных в таблице 1, в динамике и дальнейшего их распределения по фазам в течение одного офисного рабочего дня с 9:00 до 18:00 была составлена и приведена в таблице 2 почасовая технологическая карта работы электроприемников, где 1 – электроприемник подключен к сети на указанном промежутке времени, 0 – электроприемник отключен от сети на указанном промежутке времени.

Таблица 1 / Table 1

**Электроприемники, расположенные на одном из этажей офисного здания /  
Electrical consumers located on one of the floors of an office building**

| №<br>n/n | Тип<br>электроприемника | $I_{\phi}, A$ | THDI,<br>% | №<br>n/n | Тип<br>электроприемника | $I_{\phi}, A$ | THDI,<br>% |
|----------|-------------------------|---------------|------------|----------|-------------------------|---------------|------------|
| 1        | Монитор № 1             | 0,20          | 155,38     | 13       | Холодильник             | 0,68          | 12,25      |
| 2        | Монитор № 2             | 0,21          | 163,25     | 14       | Микроволновая печь      | 4,99          | 31,42      |
| 3        | Монитор № 3             | 0,20          | 155,38     | 15       | Освещение               | 0,87          | 10,98      |
| 4        | Монитор № 4             | 0,21          | 163,25     | 16       | Освещение               | 0,87          | 10,98      |
| 5        | Монитор № 5             | 0,21          | 147,78     | 17       | Освещение               | 0,87          | 10,98      |
| 6        | ЖК-телевизор            | 0,64          | 35,50      | 18       | Освещение               | 0,87          | 10,98      |
| 7        | ПК № 1                  | 1,53          | 15,25      | 19       | Освещение               | 0,87          | 10,98      |
| 8        | ПК № 2                  | 0,43          | 151,22     | 20       | Ноутбук № 1             | 0,34          | 179,71     |
| 9        | ПК № 3                  | 0,57          | 142,78     | 21       | Ноутбук № 2             | 0,18          | 188,38     |
| 10       | ПК № 4                  | 1,53          | 15,25      | 22       | Ноутбук № 3             | 0,36          | 36,7       |
| 11       | ПК № 5                  | 1,53          | 15,25      | 23       | Ноутбук № 4             | 0,19          | 223,22     |
| 12       | МФУ                     | 2,53          | 38,47      | 24       | Ноутбук № 5             | 0,15          | 206,76     |

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

Таблица 2 / Table 2

**Технологическая карта работы электроприемников / Technological map of work  
of electrical consumers**

| Тип электроприемника | 9:00-<br>10:00 | 10:00-<br>11:00 | 11:00-<br>12:00 | 12:00-<br>13:00 | 13:00-<br>14:00 | 14:00-<br>15:00 | 15:00-<br>16:00 | 16:00-<br>17:00 | 17:00-<br>18:00 |
|----------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Монитор № 1          | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| Монитор № 2          | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| Монитор № 3          | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| Монитор № 4          | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| Монитор № 5          | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| ЖК-телевизор         | 0              | 0               | 1               | 0               | 1               | 1               | 0               | 1               | 0               |
| ПК № 1               | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| ПК № 2               | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| ПК № 3               | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| ПК № 4               | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| ПК № 5               | 1              | 1               | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| МФУ                  | 0              | 1               | 0               | 1               | 0               | 0               | 1               | 0               | 0               |
| Холодильник          | 1              | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               |
| Микроволновая печь   | 0              | 0               | 0               | 0               | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Освещение            | 1              | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| Освещение            | 1              | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| Освещение            | 1              | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| Освещение            | 1              | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 1               | 1               |

|             |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ноутбук № 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Ноутбук № 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Ноутбук № 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Ноутбук № 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Ноутбук № 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

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

В разработанной авторами программе одно из окон (рисунок 2) предназначено для ввода данных согласно технологической карте, что позволяет осуществить поиск наилучшей комбинации распределения электроприемников по итогу их работы в течение офисного рабочего дня.

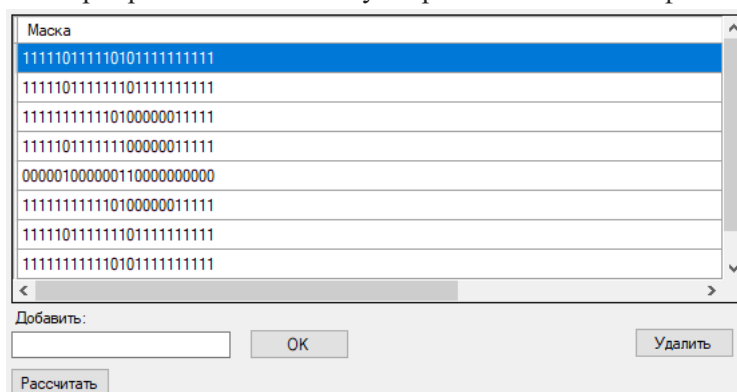


Рис. 2. Окно для ввода данных согласно технологической карте /

Fig. 2. Window for data entry according to the flow chart

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

Комбинация оптимального распределения электроприемников по фазам линий L1, L2, L3, в этажном распределительном щите с учетом их работы в динамике при помощи ГА приведена в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

**Комбинация оптимального распределения электроприемников /  
Combination of optimal distribution of electrical consumers**

|                     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| № электроприемника  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| Линия распределения | L3 | L1 | L3 | L2 | L1 | L1 | L1 | L3 | L2 | L2 | L3 | L1 |
| № электроприемника  | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Линия распределения | L2 | L3 | L3 | L1 | L3 | L2 | L2 | L2 | L3 | L3 | L2 | L1 |

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

Полученные в результате расчета в разработанной программе параметры тока в ходе распределения электроприемников, согласно полученной комбинации, приведенной в таблице 3, будут способствовать снижению дополнительных потерь и величин ПКЭ, они приведены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

**Параметры тока при оптимальном распределении электроприемников по фазам  
Current parameters at uniform distribution of electric consumers by phases**

|                      |                      |                      |                       |                       |                           |                           |                           |
|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $THD_{\text{Л1}} \%$ | $THD_{\text{Л2}} \%$ | $THD_{\text{Л3}} \%$ | $K_{0p} \text{ o.e.}$ | $K_{2p} \text{ o.e.}$ | $I_{\text{Л1}} \text{ A}$ | $I_{\text{Л2}} \text{ A}$ | $I_{\text{Л3}} \text{ A}$ |
| 22,25                | 20,98                | 22,81                | 0,22                  | 0,27                  | 5,73                      | 4,36                      | 8,88                      |

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

Дополнительные потери, вызванные несинусоидальностью, составили  $\Delta P_{\text{несим}} - 0,58$  Вт, а дополнительные потери мощности, вызванные несимметрией  $\Delta P_{\text{несим}} - 5,55$  Вт соответственно. Общие дополнительные потери, вызванные несимметрией и несинусоидальностью  $\Delta P_{\text{доп}}$ , составили – 6,13 Вт. Потери, вызванные основной гармонической составляющей тока, – 11,7 Вт, а следовательно, дополнительные потери от ВГ тока составляют – 4,9 % от величины потерь, обусловленных основной гармонической составляющей.

Оценка величин указанных дополнительных потерь мощности необходима для анализа суммарной доли дополнительных потерь в структуре суммарных потерь в распределительных сетях 0,4 кВ. Особенно эффективно выполнять эту оценку на стадии проектирования СЭС. Разработанная программа может быть реализована в виде плагина для программных комплексов в рамках концепции BIM-проектирования и применяться на стадии проектирования с целью оптимального распределения электроприемников по фазам линий  $L_1, L_2, L_3$  [22].

На данный момент при BIM-проектировании СЭС для равномерного распределения электроприемников по фазам сети используют подход, заключающийся в упорядочивании электроприемников по убыванию значений их номинального действующего значения силы тока и дальнейшего распределения первых трех электроприемников с максимальными номинальными действующими значениями силы тока по одному на каждую фазу линий  $L_1, L_2, L_3$ . После этого в порядке уменьшения величины номинального действующего значения силы тока выполняется пошаговое распределение на менее загруженные фазы оставшихся электроприемников. Указанный подход используется в соответствии с техническим руководством по проектированию электрических установок, предназначенным для специалистов, работающих в конструкторских бюро, разработанным и используемым в виде плагина компанией Systeme electric, и позволяет распределить электроприемники только в статическом режиме их работы (к сети одновременно подключены все электроприемники).

В ходе исследования был выполнен сравнительный анализ параметров тока и суммарных дополнительных потерь мощности при равномерном распределении электроприемников, приведенных в таблице 1, по фазам линий  $L_1, L_2, L_3$  при использовании подхода, предлагаемого компанией Systeme electric (подход № 1) и описанного ранее в статье (подход № 2) в статическом режиме. Результаты сравнительного анализа полученных параметров тока и дополнительных потерь приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 / Table 5

**Параметры тока при распределении однофазных электроприемников по фазам в статическом режиме / Current parameters in the distribution of single-phase electric receivers by phases in static mode**

| Параметры | $THD_{L1}, \%$ | $THD_{L2}, \%$ | $THD_{L3}, \%$ | $K_{0P}$ о.е. | $K_{2P}$ о.е. | $I_{0L1}, A$ | $I_{0L2}, A$ | $I_{0L3}, A$ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Подход №1 | 33,77          | 12,32          | 21,01          | 0,188         | 0,19          | 6,25         | 6,63         | 6,45         |
| Подход №2 | 20,76          | 38,63          | 14,72          | 0,13          | 0,19          | 5,94         | 6,41         | 6,86         |

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

Таблица 6 / Table 6

**Дополнительные потери мощности при распределении электроприемников по фазам в статическом режиме / Additional power losses during phase distribution of electrical receivers in static mode**

| Параметры  | $\Delta P_{\text{несим}}, Bm$ | $\Delta P_{\text{несим}}, Bm$ | $\Delta P_{\text{доп}}, Bm$ |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Подход № 1 | 0,59                          | 2,63                          | 3,23                        |
| Подход № 2 | 0,72                          | 1,22                          | 1,94                        |

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

Разработанная программа позволила выполнить анализ суммарных дополнительных потерь при распределении электроприемников в динамическом режиме работы, на промежутке всего периода рабочего дня за каждый час, для подхода № 1 и подхода № 2, результаты которого приведены в таблице 7.

Таблица 7 / Table 7

**Дополнительные потери мощности при распределении электроприемников по фазам в динамическом режиме / Additional power losses during phase distribution of electric receivers in dynamic mode**

| Интервалы                                | 9:00-10:00 | 10:00-11:00 | 11:00-12:00 | 12:00-13:00 | 13:00-14:00 | 14:00-15:00 | 15:00-16:00 | 16:00-17:00 | 17:00-18:00 | Итого |
|------------------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Подход № 1, $\Delta P_{\text{доп}}$ , Вт | 5,5        | 7,9         | 2,4         | 3,5         | 8,2         | 2,4         | 7,9         | 6,9         | 5,5         | 50,2  |
| Подход № 2, $\Delta P_{\text{доп}}$ , Вт | 0,5        | 0,88        | 0,79        | 1,09        | 5,44        | 0,79        | 0,88        | 0,59        | 0,5         | 11,46 |

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

Анализ величин суммарных дополнительных потерь при распределении электроприемников в динамическом режиме показал, что при использовании подхода № 2 они снижаются на 77,1 % от аналогичных потерь, возникающих при применении подхода № 1.

**Заключение / Conclusion.**

1. Полученные результаты работы позволяют предложить следующую методику распределения электроприемников в СЭС. В качестве исходных данных, полученных при помощи разработанного цифрового измерителя параметров работы однофазных электроприемников, для реализации метода используются массивы мгновенных значений потребляемой однофазными электроприемниками силы тока, синхронизированных по переходу через ноль значения напряжения, над которыми выполняются операции по разложению фазных токов линий  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  на симметричные составляющие токов обратной  $I_2$ , прямой  $I_1$ , и нулевой  $I_0$  последовательностей. Для оценки долевого вклада дополнительных потерь мощности, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью, в структуре суммарных потерь в качестве целевой функции оценивающей несимметрию принята величина потерь в несимметричном режиме над потерями в симметричном режиме, а для оценки дополнительных потерь от несинусоидальности принята величина суммарных потерь от высших гармонических составляющих тока.

2. Обосновано преимущество применения разработанной методики в действующих и вновь проектируемых системах электроснабжения перед применением традиционного подхода путем сравнения величин дополнительных потерь электроэнергии, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью, в ходе распределения однофазных электроприемников в статическом и динамическом режимах. При использовании предлагаемой методики суммарные дополнительные потери при распределении однофазных электроприемников в статическом режиме оказались на 39,9 %, а в динамическом режиме – на 77,1 % меньше.

3. Применение эвристического метода оптимизации в виде классического генетического алгоритма позволило расширить поиск наилучшей комбинации распределения электроприемников и полностью исключить зависимость между общим количеством электроприемников, которые необходимо распределить, и временем для поиска наилучшего решения, что также позволило снизить вычислительную мощность ЭВМ, на которой выполняется работа программы.

4. Разработанная методика, применимая как на стадии эксплуатации, так и на стадии ВМ-проектирования СЭС, позволяет получить принципиально новые технические решения, способствующие повышению энергоэффективности передачи и качества электрической энергии, позволяющие минимизировать потери в оборудовании систем электроснабжения, за счет снижения дополнительных потерь обусловленных несимметрией и несинусоидальностью.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Юндин М. А. Исследование несинусоидальности и несимметрии в современных электросетях 0,38 кВ / М. А. Юндин, С. М. Пятикопов, Д. В. Сливин // *Инновации. Наука. Образование*. 2020. № 23. С. 278–286.
2. Ольховский В. Я. Исследование воздействия высших гармоник мелких нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В / В. Я. Ольховский, Т. В. Мятёж, С. Ю. Наяков // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2016. № 1(30). С. 84–97. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2016-1-84-97>
3. Бирюлин В. И. Исследование проблем качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ / В. И. Бирюлин, Д. В. Куделина, И. В. Брежнев // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 109–121.
4. Наумов И. В. Повышение эффективности электропотребления в условиях изменяющегося качества электрической энергии / И. В. Наумов // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 16. № 5. С. 559–574.
5. Сравнение показателей нормирования гармонических составляющих тока в основных ветвях нагрузки / М. Е. Биткин, Э. Е. Рогачев, И. П. Скрыбин, О. В. Крюков // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2021. № 9(146). С. 20–28.
6. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. Киев: Наукова думка, 1985. 268 с.
7. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И. В. Жежеленко. М.: Энергоатомиздат, 2000. 104 с.
8. Горбунов А. О. Критерий расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии / А. О. Горбунов // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2021. № 5(199). С. 113–118.
9. Каялов Г. М., Троицкий А. И. Расчет оптимального режима группы мощных однофазных электроприемников при внутреннем симметрировании / Г. М. Каялов, А. И. Троицкий // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 1982. № 5. С. 613–618.
10. Терешкевич Л. Б. Об одном алгоритме внутреннего симметрирования при управлении несимметричным режимом электрической сети / Л. Б. Терешкевич // *Известия высших учебных заведений. Энергетика*. 1980. № 12. С. 73–75.
11. Надтока И. И. Теоретико-групповой подход к решению задачи симметрирования нагрузок однофазных электроприемников / И. И. Надтока // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 1987. № 3. С. 97–100.
12. Jeon Y. J., Kim J. C., Kim J. O., Lee K. Y. An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2002. No. 17(4). P. 1070–1078. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803823>
13. Vulasala G., Sirigiri S., Thiruveedula R. Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Unbalanced Distribution System Using Genetic Algorithm // *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2009. No. 3(12). P. 754–762. URL: [https://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electrical\\_engineering/Feeder%20Reconfiguration.pdf](https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Feeder%20Reconfiguration.pdf) [Accessed 10 February 2025].
14. Lafortune M., Bouchard D., Morelli J. Phase Swapping for Distribution System Using Tabu Search // *WSEAS International Conference on Energy Planning. Energy Saving. Environmental Education*. Arcachon, France, 2007. P. 67–71. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007franceenv/papers/571-188.pdf> [Accessed 10 February 2025].
15. Navarro B. B., Cruz I. B. N. C., Malquist B. M. Radial network reconfiguration and load balancing for loss minimization using genetic algorithms // *TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference*. 2012. <https://doi.org/10.1109/tencon.2012.6412219>
16. Homaei O., Najafi A., Dehghanian M., Attar M., Falaghi H. A practical approach for distribution network load balancing by optimal re-phasing of single phase customers using discrete genetic algorithm // *Int Trans Electr Energy Syst*. 2019. No. 29:e2834. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.2834>
17. Ivanov O., Neagu B. C., Gavrila M., Grigoras G., Sfintes C. V. Phase Load Balancing in Low Voltage Distribution Networks Using Metaheuristic // *Algorithms International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. Craiova, Romania, 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2019.8905900>
18. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* // University of Michigan Press, 1975.

19. Soltani S. H., Rashidinejad M., Abdollahi A. Dynamic phase balancing in the smart distribution networks // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017. No. 93. P. 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.06.016>
20. Петров А. В., Костюков Д. А. Способ цифровой обработки трехфазного сигнала для выделения симметричных составляющих // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2022. № 3(90). С. 7–15. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2022.3.1>
21. Пестерев А. А., Костинский С. С., Наракидзе Н. Д. Эмпирическое обоснование преимущества применения модифицированного метода симметричных составляющих для оценки величины силы тока нулевой последовательности в распределительных электрических сетях // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2024. № 4. С. 28–38. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.3>
22. Pesterev A. A., Kostinskiy S. S. Plug-In Software for the Phase Distribution of Single-Phase Consumers in Electric Grids Used in Digital Twin Design and Development Based on the BIM Technology // *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2023. P. 255–260. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM57311.2023.10138972>
23. Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // *Омский научный вестник*. 2018. № 2 (158). С. 60–64. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-60-64>
24. Кобелев А. В., Зыбин А. А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2011. Т. 17. № 1. С. 187–191.

## REFERENCES

1. Yundin MA, Pyatikopov SM, Slivin SM. Study of non-sinusoidality and asymmetry in modern 0.38 kV power grids. *Innovations. Science. Education*. 2020;(23):278-286. (In Russ.).
2. Ol'hovskij VYa, Myatezh TV, Nayaksov SYu. Investigation of the influence of higher harmonics of small nonlinear consumers on the operation of the network up to 1000 V. *Reports of the Academy of Sciences of the higher school of the Russian Federation*. 2016;1(30):84-97. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2016-1-84-97>
3. Biryulin VI, Kudelina DV, Brezhnev IV. Electricity quality problems investigation in networks with a voltage of 0.4 KV. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2022;14(1(53)):109-121. (In Russ.).
4. Naumov IV. Improving the efficiency of electricity consumption in changing power quality conditions. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2023;16(5):559-574. (In Russ.).
5. Bitkin ME, Rogachev EE, Skryabin IP, Kryukov OV. Comparison of the indicators for normalizing harmonic components of current in the main branches of the load. *Automatization and IT in power supply*. 2021;9(146):20-28. (In Russ.).
6. Shidlovskij AK, Kuznecov VG. Improving the quality of energy in electrical networks. Kiev: Naukova dumka; 1985. 268 p. (In Russ.).
7. Zhezhelenko IV. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. Moscow: Energoatomizdat; 2000. 104 p. (In Russ.).
8. Gorbunov AO. The criterion for calculating losses from non-sinusoidal current in the line. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2021;5(199):113-118. (In Russ.).
9. Kayalov GM, Troitsky AI. Calculation of the optimal mode of a group of powerful single-phase electrical receivers with internal symmetrization. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 1982;(5):613-618. (In Russ.).
10. Tereshkevich LB. On one algorithm of internal symmetrization in controlling the asymmetric mode of an electrical network. *Bulletin of higher educational institutions. Power engineering*. 1980;(12):73-75. (In Russ.).
11. Nadtoke II. Group-theoretical approach to solving the problem of symmetrization of loads of single-phase electrical receivers. *Bulletin of higher educational institutions. Electromechanics*. 1987;(3):97-100. (In Russ.).
12. Jeon YJ, Kim JC, Kim JO, Lee KY. An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2002;17(4):1070-1078. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803823>
13. Vulasala G, Sirigiri S, Thiruveedula R. Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Unbalanced Distribution System Using Genetic Algorithm. *International Journal of Electrical and Electronics*

- Engineering. 2009;3(12):754-762. Available from: [https://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electrical\\_engineering/Feeder%20Reconfiguration.pdf](https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Feeder%20Reconfiguration.pdf) [Accessed 10 February 2025].
14. Lafortune M, Bouchard D, Morelli J. Phase Swapping for Distribution System Using Tabu Search. WSEAS International Conference on Energy Planning. Energy Saving. Environmental Education. Arcachon, France; 2007. P. 67-71. Available from: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007franceenv/papers/571-188.pdf> [Accessed 10 February 2025].
  15. Navarro BB, Cruz IBNC, Malquist BM. Radial network reconfiguration and load balancing for loss minimization using genetic algorithms. TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference; 2012. <https://doi.org/10.1109/tencon.2012.6412219>
  16. Homaei O, Najafi A, Dehghanian M, Attar M, et al. A practical approach for distribution network load balancing by optimal re-phasing of single phase customers using discrete genetic algorithm. Int Trans Electr Energy Syst. 2019;29:e2834. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.2834>
  17. Ivanov O, Neagu BC, Gavrilas M, Grigoras G, et al. Phase Load Balancing in Low Voltage Distribution Networks Using Metaheuristic. Algorithms International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). Craiova, Romania; 2019. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2019.8905900>
  18. Holland JH. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press; 1975.
  19. Soltani SH, Rashidinejad M, Abdollahi A. Dynamic phase balancing in the smart distribution networks. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2017;(93):374-383. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.06.016>
  20. Petrov AM, Kostyukov DA. Method for digital processing of a three-phase signal for extraction symmetric components. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2022;(3):7-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2022.3.1>
  21. Pesterev AA, Kostinskiy SS, Narakidze ND. Empirical substantiation of the advantage of using the modified method of symmetrical components to estimate the value of zero-sequence current in distribution grids. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;(4):28-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.3>
  22. Pesterev AA, Kostinskiy SS. Plug-In Software for the Phase Distribution of Single-Phase Consumers in Electric Grids Used in Digital Twin Design and Development Based on the BIM Technology. 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); 2023. P. 255-260. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM57311.2023.10138972>
  23. Ded AV, Sikorsky SP, Smirnov PS. Results of measurements of electric power quality indicators in power supply systems of enterprises and organizations. Omsk Scientific Bulletin. 2018;2(158):60-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-60-64>
  24. Kobelev AV, Zybin AA. Current Issues of Higher Harmonics in the Power Urban Systems. Transactions TSTU. 2011;1(17):187-191. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александр Александрович Пестерев** – аспирант, ассистент кафедры электроснабжения и электропривода (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ), Researcher ID: КОС-2411-2024.

**Сергей Сергеевич Костинский** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и электропривода (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ), Researcher ID: АВГ-7265-2020.

**Нури Дазмирович Наракидзе** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных и измерительных систем и технологий (ИИСТ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ), Researcher ID: А-4713-2014.

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Александр Александрович Пестерев.** Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

**Сергей Сергеевич Костинский.** Формулирование цели исследования, утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

**Нури Дазмирович Наракидзе.** Сбор исходных электротехнических данных, контроль и утверждение результатов исследований. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleksandr A. Pesterev** – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Systems and Electric Drive, South-Russian State Polytechnic University, Researcher ID: KOC-2411-2024.

**Sergey S. Kostinskiy** – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor of the Department of Electric Power Systems and Electric Drive, South-Russian State Polytechnic University, Researcher ID: ABG-7265-2020.

**Nuri D. Narakidze** – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor of the Department of Information and Measurement Systems and Technologies, South-Russian State Polytechnic University, Researcher ID: A-4713-2014.

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Aleksandr A. Pesterev.** Conducting research – data collection, analysis and interpretation. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.

**Sergey S. Kostinskiy.** 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.

**Nuri D. Narakidze.** Formulating of the purpose of the research, collecting of initial electrical data, monitoring and approving of the research results. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.