

Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 1 (49). С. 69–80
Vestnik Kurganskoj GSNA. 2024; (1-49): 69–80

Научная статья

УДК 621.316.1

Код ВАК 4.3.2

EDN: ZPHZRH

КОМБИНИРОВАННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Игорь Владимирович Наумов¹, Сергей Валерьевич Подъячих²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

² Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежовского, поселок Молодежный, Россия

¹ professornaumov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4767-0127>

² psv78@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7031-0704>

Аннотация. Цель – исследование качества электрической энергии и уровня её потерь в действующих распределительных электрических сетях низкого напряжения. На основе измерений в действующих электрических сетях (ЭС) исследованы режимы их работы при питании различных видов производственной и коммунально-бытовой нагрузки потребителей. Измерения произведены с помощью сертифицированных приборов. Установлен объективный характер нарушения требований к показателям, характеризующим качество электрической энергии (ПКЭ), проявляющийся в превышении установленных норм для несимметрично-несинусоидальных (несбалансированных) режимов. Показана взаимосвязь измененных ПКЭ с дополнительными потерями электрической энергии, не только вызывающими превышение нормируемого электропотребления, но и приводящими к возникновению чрезвычайных ситуаций. Предложена новая модель технического средства (ТС), обеспечивающая нормализацию ПКЭ и снижение соответствующих потерь электрической энергии. В качестве методологической базы исследований использованы методы теории электрических цепей, численного анализа, технологии программного обеспечения Excel, графического редактора *Matlab*, а также авторский метод расчета несбалансированных режимов. На основе разработанного программного обеспечения произведены расчет и анализ имитационной модели несимметрично-несинусоидального (НН) электропотребления с интеграцией в электрическую сеть предлагаемого комбинированного технического средства. В результате произведенных исследований определено наиболее целесообразное место установки ТС в электрической сети, в котором проявляется его наибольшая эффективность по минимизации последствий несбалансированных режимов. Кроме того, на основе разработанного метода и инструментария расчета доказана эффективность предлагаемой модели ТС в минимизации последствий несбалансированных режимов. При установке ТС отмечено снижение дополнительных потерь мощности, обусловленных несбалансированным электропотреблением, что составило 78 %, а снижение показателей, характеризующих качество электрической энергии, достигло 70 %.

Ключевые слова: несимметрия, несинусоидальность, несбалансированность, качество, потери, компенсирующее устройство, дополнительные симметричные составляющие, гармонические искажения.

Для цитирования: Наумов И.В., Подъячих С.В. Комбинированное техническое средство для повышения качества и снижения потерь электроэнергии в низковольтных электрических сетях // Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 1 (49). С. 69–80. EDN: ZPHZRH.

Scientific article

COMBINED TECHNICAL EQUIPMENT FOR IMPROVING THE QUALITY AND REDUCING POWER LOSSES IN LOW-VOLTAGE ELECTRIC NETWORKS

Igor V. Naumov¹, Sergey V. Podyachikh²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny village, Russia

¹ professornaumov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4767-0127>

² psv78@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7031-0704>

Abstract. The purpose is to study the electric power quality and the level of its losses in the operating low-voltage electric distribution networks. Based on the measurements in the operating electric networks (EN), the modes of their operation are studied when providing power supply of various types of industrial and residential loads for consumers. The measurements were made using certified instruments. The research has established an objective nature of violating the requirements for the indicators characterizing the quality of electric power (PQI), manifested in exceeding the established norms for asymmetrically non-sinusoidal (unbalanced) modes. The study shows the relationship of the modified PQI with additional losses of electric power, causing not only an excess of the normalized power consumption, but also leading to emergency situations. A new model of the technical equipment (TE) is proposed, which ensures normalization of the PQI and reduction of the corresponding losses of electrical power. The methods of the theory of electrical circuits, numerical analysis, *Excel* software technology, *Matlab* graph editor, as well as the

author's method of calculating unbalanced modes were used as a methodological basis for the research. Based on the developed software, the calculation and analysis of the simulation model of asymmetric-non-sinusoidal (AN) power consumption with integration into the electrical network of the proposed combined technical equipment was carried out. As a result of the conducted research, the most appropriate place for installing the TE in the electrical network has been determined. At this place the greatest effectiveness of the TE in minimizing the consequences of unbalanced modes is manifested. In addition, based on the developed method and calculation tools, the effectiveness of the proposed equipment model in minimizing the consequences of unbalanced regimes has been proven. When installing the equipment, there was a decrease in additional power losses due to unbalanced power consumption, which amounted to 78 %, and a decrease in indicators characterizing the quality of electric power reached 70 %.

Keywords: asymmetry, non-sinusoidality, imbalance, quality, losses, compensating device, additional symmetrical components, harmonic distortion.

For citation: Naumov I.V., Podyachikh S.V. Combined technical equipment for improving the quality and reducing power losses in low-voltage electric networks. Vestnik Kurganskoy GSXA. 2024; (1-49): 69–80. EDN: ZPHZRH. (In Russ).

Введение. Нарушения электромагнитной совместимости технических средств в единой электрической сети, объединяющей процессы преобразования, распределения и передачи электрической энергии, вызываются измененным характером электропотребления в силу генерации электромагнитных переходных помех, обусловленных индивидуальными особенностями режимных характеристик отдельных электроприемников. В связи с этим распределительная низковольтная электрическая сеть начинает функционировать в утяжеленных условиях, вызывающих нарушение норм качества и увеличение потерь электрической энергии, влекущих за собой резкое снижение уровня надежности электропередачи и создающих условия возникновения чрезвычайных ситуаций. Одними из наиболее характерных режимов, обуславливающих искажение качества и увеличение потерь электроэнергии, служат НН режимы работы, создающие дополнительные совокупности составляющих токов и напряжений в низковольтных электрических сетях [1].

Государственным стандартом ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [2] устанавливается несколько критериев, характеризующих нормы качества электрической энергии:

$$K_{2u} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\%; \quad K_{0u} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \quad K_{0n} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \times 100\%$$

$$\delta U_{(-)} = \left[\frac{U_H - U_{m(-)}}{U_0} \right] \times 100; \quad \delta U_{(+)} = \left[\frac{U_{m(+)} - U_H}{U_H} \right] \times 100, \quad (1)$$

где K_{2u} и K_{0u} – коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательностям напряжения соответственно;

$U_{(n)}$ – напряжение гармонической составляющей до 40-го порядка;

$U_{(1)}$ – напряжение основной гармонической составляющей;

$\delta U_{(-)}$; $\delta U_{(+)}$ – соответственно отрицательное и положительное установившиеся отклонения напряжения;

U_1 , U_2 , U_0 – симметричные составляющие на-

пряжения, соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностям напряжения электропитания;

$U_{m(-)}$; $U_{m(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_H и большие U_H соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин согласно требованиям [1];

U_H – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению или согласованному напряжению [3].

В основе определения симметричных составляющих токов и напряжений, создающих потоки искажающих факторов, лежит разработанный метод, подробно описанный авторами ранее. В соответствии с этим методом критерием, оценивающим превышение потерь в несимметричном режиме, по сравнению с потерями мощности, обусловленными токами только прямой последовательности, может служить коэффициент потерь [4]:

$$K_{P(H)} = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \times K_R, \quad (2)$$

где $K_R = \frac{r_0}{r_1}$ – коэффициент активного сопротивления линии электропередачи (ЛЭП);

$r_1 = r_{\Phi}$ – активное сопротивление прямой последовательности, равное фазному сопротивлению ЛЭП;

$r_0 = r_{\Phi} + 3r_N$ – активное сопротивление нулевой последовательности ЛЭП;

r_N – активное сопротивление нейтрального проводника.

При одинаковых сечениях фазного и нулевого проводников, их активные сопротивления будут равны. Соответственно и коэффициент K_R в этом случае будет равен 4. K_{2i} , K_{0i} – коэффициенты, обусловленные протеканием токов обратной и нулевой последовательностей основной частоты, определяемые в соответствии с методикой, предложенной И. В. Наумовым с соавт. (2023) [4].

В дополнение к последовательностям, образующим несимметричными режимами токов основной гармонической составляющей частоты, согласно теории электрических цепей [5], определенные высшие гармонические составляющие (ВГС) также

образуют дополнительные последовательности. Так, составляющие $I_4, I_7, I_{13}, I_{19}, I_{25}$ образуют дополнительную прямую последовательность; токи $I_2, I_3, I_{11}, I_{17}, I_{23}$ – дополнительную обратную и токи I_6, I_9, I_{12}, I_{15} – дополнительную нулевую последовательности [6–8].

С учетом этого в НН режимах выражение (2) для коэффициента потерь трансформируется следующим образом:

$$K_{P(НН)} = 1 + \left(\sum K_{n(1)}\right)^2 + K_{2i}^2 \left(\sum K_{n(2)}\right)^2 + \left\{K_{0i}^2 \left(\sum K_{n(1)}\right)^2\right\} \times K_R, \quad (3)$$

где коэффициенты $\sum K_{n(1)}; \sum K_{n(2)}; \left(\sum K_{n(0)}\right)^2$ – суммарные коэффициенты, представляющие собой отношение сумм гармонических составляющих, формирующих дополнительные соответственно прямую, обратную и нулевую последовательности к гармонической составляющей тока прямой последовательности основной частоты.

Таким образом, оценивая изменение показателей, представленных выражениями (1)–(3), при отсутствии и использовании средств повышения качества электрической энергии, можно сделать вывод об эффективности применения таких ТС в условиях несбалансированного электропотребления. Под несбалансированностью электропотребления следует понимать условия функционирования электрической сети с измененными ПКЭ.

Целью исследования является изучение возможности повышения эффективности использования электрической энергии в условиях НН электропотребления за счет использования специальных ТС. Достижение указанной цели осуществляется посредством решения следующих задач:

- проанализировать уровень НН режимов в электрических сетях различного назначения;
- разработать модели балансирующего устройства (БУ), улучшающего показатели НН режима;
- провести имитационные исследования для определения наиболее эффективного места установки БУ;
- исследовать эффективность использования предлагаемой модели БУ при его интеграции в действующей низковольтной электрической сети.

Материалы и методы. В период с 2018 по 2023 гг. кафедрами электроснабжения и электротехники Иркутского государственного аграрного университета имени А. А. Ежевского и Иркутского национального исследовательского технического университета произведены исследования режимов работы в действующих электрических сетях 0,4 кВ. Объектами, получающими электропитание по этим сетям, являются промышленные предприятия г. Иркутска, агропромышленные предприятия

Иркутской области, жилые массивы микрорайонов г. Иркутска, сельские населенные пункты и индивидуальные жилые дома Иркутской области и Алтайского края. В качестве инструмента исследований использовался сертифицированный прибор Ресурс – UF2M (рисунок 1). Измерения осуществлялись в соответствии с действующим стандартом ГОСТ 30804.4.30-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерения показателей качества электрической энергии» [9].

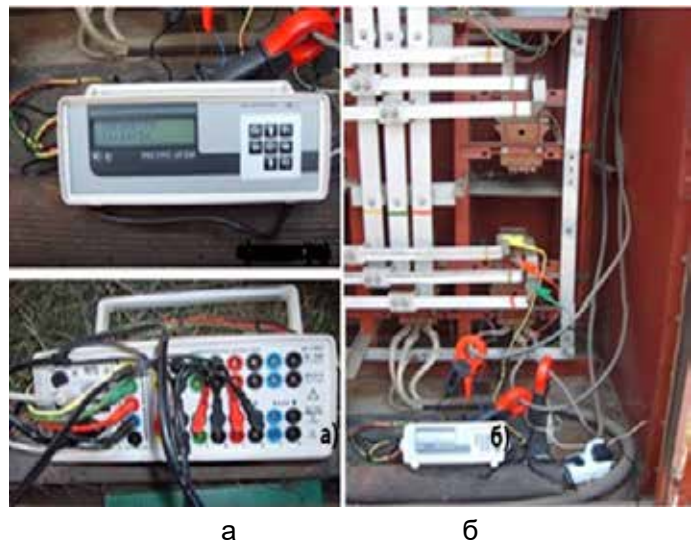


Рисунок 1 – Прибор «Ресурс-UF 2M» (а) и его подключение к исследуемой сети (б)

Исследования были произведены в действующих сетях 0,4 кВ, питающих различные объекты: производственные цеха (станочное оборудование) промышленного предприятия, производственные цеха (птицефабрика) агропромышленного комплекса, сельские населенные пункты Иркутской области и Алтайского края, многоквартирные и индивидуальные жилые дома г. Иркутска. Для каждого из объектов определялись исследуемые показатели I_p, I_2 и I_0 – по результатам измерений прибором Ресурс – UF 2M; высшие гармонические составляющие $I_{(7)}, I_{(5)}$ и $I_{(3)}$, коэффициенты K_{0U} и $K_{P(НН)}$, а также показатель δU – в результате расчета с использованием программного обеспечения [8].

В соответствии с произведенными исследованиями установлено, что согласно ГОСТ 32144-2013 усредненные значения коэффициента K_{0U} для электрических сетей промышленных предприятий и предприятий агропромышленного комплекса составляют от 0,8 до 5,5 % [10–12], для городских сетей, питающих коммунально-бытовую нагрузку потребителей (многоквартирные дома), – от 1,2 до 4,5 % [13–15]; для сетей сельских населенных пунктов – от 2 до 7,2 % [16–18]; для индивидуаль-

ных жилых домов (ИЖД) – от 1,8 до 3,6 % [19]. Средние значение для коэффициента δU для указанных объектов составляют соответственно (\pm): 3,2–5,6 %; 2,7–4,5 %; 4,8–9 % и 2,6–6,4 %. Для коэффициента потерь мощности ($K_{P(НН)}$): 1,4–2,76; 1,6–1,98; 1,8–4,1 и 1,7–2,3 [19–21]. На рисунках 2–4 представлены диаграммы изменения отдельных показателей несбалансированности режима (ПНР) в электрических сетях, питающих некоторые объекты.

На рисунке 2 представлены диаграммы изменения исследуемых показателей в электрической сети сельского населенного пункта (с. Зональное, Бийского района Алтайского края, июнь 2022 г.) и сети, питающей производственную нагрузку (производственный цех птицефабрики, с. Белореченское, октябрь 2022 г.). На рисунке 3 представлены диаграммы изменения отдельных ПНР в электрической сети ИЖД (декабрь 2021 г.), на рисунке 4 – изменение коэффициента потерь в производственном цехе промышленного предприятия г. Иркутска (февраль-март 2023 г.).

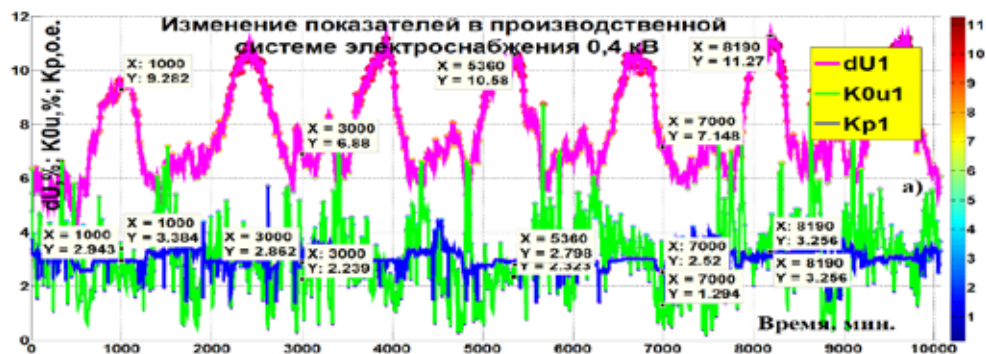
Как видно из представленных рисунков, ПНР изменяются в широких пределах, что в значительной степени превышает установленные нормы для качества электрической энергии и приводит к увеличению её потерь.

При этом особое внимание необходимо уделять именно величине коэффициента потерь

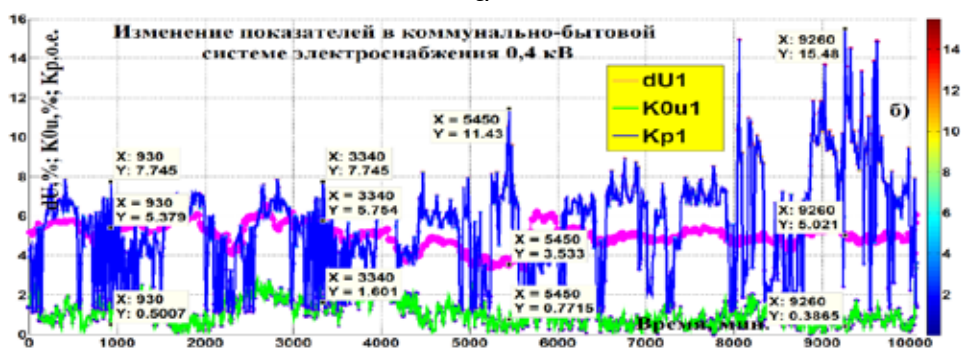
мощности, который в отдельных случаях достигает больших значений. Проведенными исследованиями установлено, что высокие коэффициенты потерь не только увеличивают электропотребление, но и создают условия для возникновения пожаров [21].

Таким образом, приведенные данные исследований НН режимов в действующих электрических сетях доказывают необходимость разработки способов и технических средств, повышающих качество и снижающих дополнительные потери электрической энергии, обусловленные несбалансированным электропотреблением.

Минимизация последствий НН режимов может быть достигнута различными способами, наиболее эффективными из которых можно считать специальные технические устройства, снижающие величины симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей, обусловленных основной гармонической составляющей (50 Гц), а также дополнительные прямую, обратную и нулевую последовательности, образованные соответствующими совокупностями ВГС [7]. Произведенный анализ существующих средств балансирования несинусоидально-несимметричных режимов работы [6; 7; 22] показал, что наиболее целесообразным техническим средством следует считать симметрирующее устройство (СУ), функционирование которого осуществляет-



а



б

Рисунок 2 – Временные диаграммы изменения исследуемых показателей в системах электроснабжения 0,4 кВ, питающих производственную (а) и коммунально-бытовую (б) нагрузку потребителей

ся автоматически, без использования дополнительных средств управления. Подробно работа такого устройства описана автором ранее [23] (рисунок 3). В симметричном режиме нулевая последовательность близка к нулю, и стальные сердечники 3 находятся в нижнем положении, сжимая пружины 2 собственным весом.

При появлении несбалансированного тока в нулевом проводнике (за счет протекания нулевой последовательности) вследствие закона электромагнитной индукции сердечники поднимаются

вверх, растягивая пружины 2, изменяя тем самым индуктивность катушек 7. Чем выше уровень нулевой последовательности, тем выше поднимаются сердечники, изменяя параметры СУ и его мощность соответственно.

Вместе с этим данное техническое средство эффективно минимизирует только токи нулевой последовательности основной частоты и дополнительную нулевую последовательность, образованную ВГС, кратными трём.

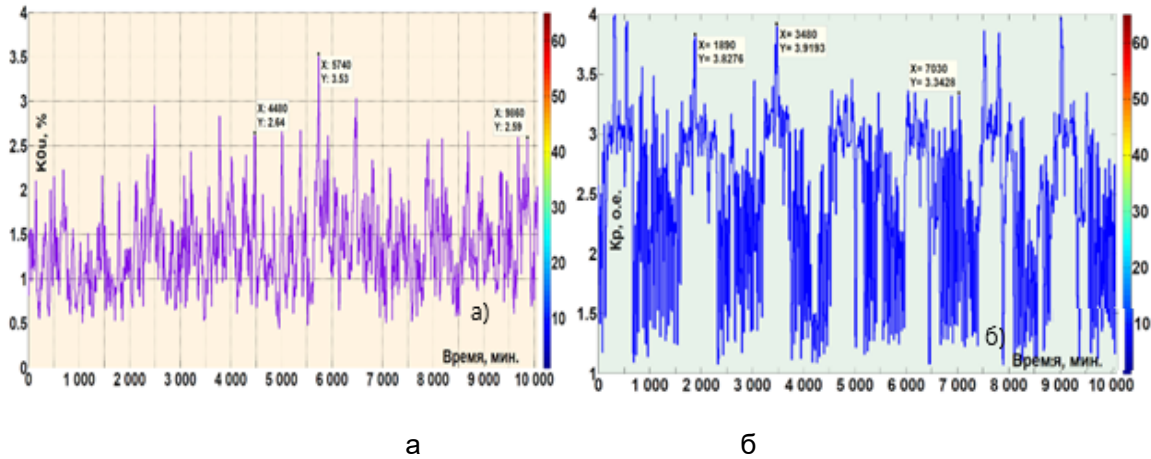


Рисунок 3 – Временные диаграммы изменения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности (а) и коэффициента потерь (б)

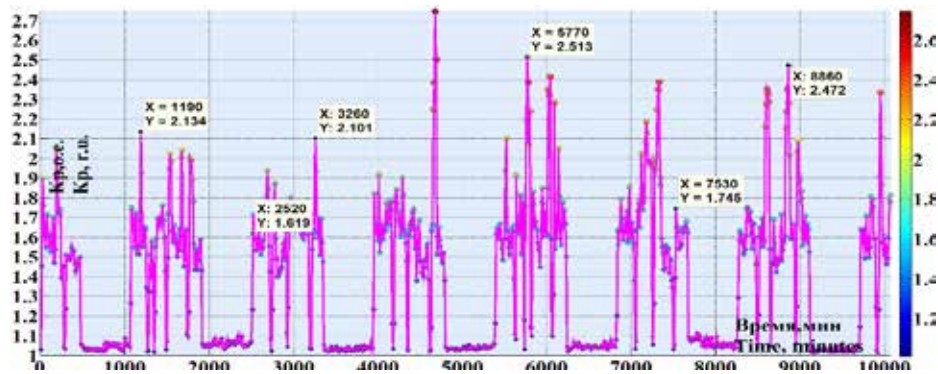
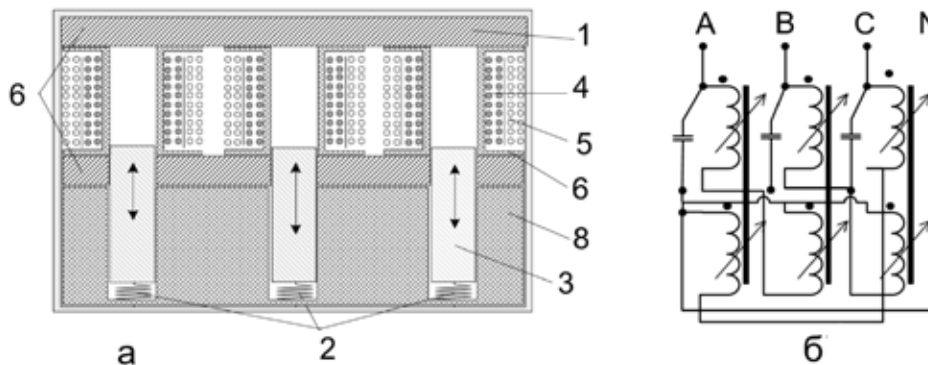
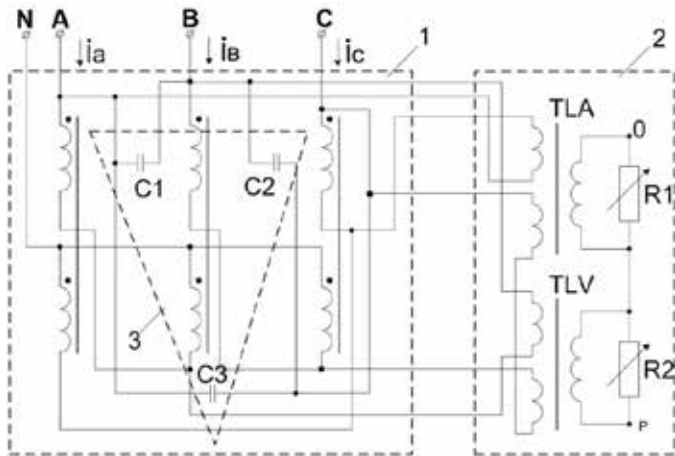


Рисунок 4 – Диаграмма изменения коэффициента потерь мощности в цеховой электрической сети промышленного предприятия



1 – корпус, 2 – пружины, 3 – подвижные сердечники, 4 – первичная обмотка, 5 – вторичная обмотка, 6 – магнитопровод, 7 – катушка индуктивности, 8 – основание

Рисунок 5 – Устройство для симметрирования составляющих нулевой последовательности: а) конструктивное исполнение, б) электрическая схема



1 – электромагнитное устройство;
2 – фильтр токов обратной последовательности (ФТОП); 3 – батарея конденсаторов
Рисунок 6 – Электрическая схема балансирующего устройства

Для фильтрации дополнительных прямой и обратной последовательностей, образованных соответствующими токами ВГС, предлагается использовать комплектацию устройства, представленного на рисунке 5, и дополнительных фильтровых схем токов обратной и прямой последовательностей (рисунок 6). На данный процесс получено положительное решение о выдаче патента RU 2023 111 725 А от 01.12.2023; заявка на изобретение № 2023111725 от 03.05.2023.

Электромагнитное устройство представляет собой СУ (рисунок 6). Фильтр тока обратной последовательности (ФТОП) представляет собой совокупность пофазно-подключенных вторичного измерительного трансформатора тока и трансреактора. При этом первичные трансформаторы тока включаются на разность токов в фазах «С» и «А», а трансреакторы – на разность токов «В» и «С». Переменные резистивные элементы, подключаемые параллельно трансформатору и трансреактору, создают напряжения, совпадающие по фазе друг с другом. Ввиду этого при подведении к фильтру составляющих прямой и обратной последовательностей на его выходе появится напряжение, пропорциональное току обратной последовательности. Таким образом, происходит отбор токов обратной последовательности основной частоты и совокупности гармонических составляющих, образующих дополнительную обратную последовательность [23]. Если трансформатор тока включить на разность токов I_B и I_A , и трансреактор – на разность I_C и I_B , то будет получен фильтр токов прямой последовательности (ФТПП), который будет вычленять совокупности гармоник, образующих прямую последо-

вательность. При подключении к зажимам ФТПП и ФТОП набора соответствующих узкополосных резонансных фильтров, каждый из которых настроен в резонанс с соответствующей гармоникой, будет происходить фильтрация дополнительных прямой и обратной последовательностей, образованных ВГС. Батарея конденсаторов 3 компенсирует нефункциональные потоки реактивной мощности и снижает соответствующие потери, образованные этими потоками.

Результаты исследований и их обсуждение. Практическую реализацию предлагаемой модели балансирующего устройства рассмотрим на примере интеграции его имитационной модели в действующую систему электроснабжения (ДСЭ). В качестве ДСЭ использована система, питающая главный корпус Иркутского государственного аграрного университета имени А. А. Ежевского.

Исследование режимов работы данного объекта произведено в период с 10:00 11.04.2023 г. до 9:50 18.04.2023 г.). В качестве инструмента исследования использовался «Анализатор качества электрической энергии Sonel PQM-701». Измеряемые показатели усреднялись и фиксировались на жестком диске прибора в каждом из 10-минутных интервалов в соответствии с ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [2]. За период наблюдения проанализировано 1008 таких интервалов. В качестве потребителей, получающих питание, представлены все виды групп электроприемников, находящихся в учебном корпусе. Источником питания является силовой трансформатор ТМГ 630-10/0,4 кВ, получающий питание по линии 10 кВ марки АС-35 протяженностью 425 м.

Измерение производилось на шинах РУ 0,4 кВ, которое получают питание по кабельной ЛЭП марки АВВГ, сечением 4x50 мм², находящимся от шин ТП 0,4 кВ на расстоянии 26 м (рисунок 7).

Методологической основой исследования является описанный авторами ранее метод определения показателей несбалансированности при наличии в системе средства балансировки. Усовершенствование данного метода заключается в том, что в схемах замещения (рисунок 8) комплексные проводимости средства балансировки для прямой, обратной и нулевой последовательности содержат не только показатели последовательностей симметричных составляющих, обусловленных основной частотой, но и соответствующие показатели, обусловленные дополнительными совокупностями ВГС.



Рисунок 7 – Подключение Sonel PQM-701 к исследуемой электрической сети

На схемах рисунка 8 обозначено:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{01} &= \underline{Y}_1 + \underline{Y}_{S1} + \underline{Y}_{BD1}; & \underline{Y}_{02} &= \underline{Y}_2 + \underline{Y}_{S2} + \underline{Y}_{BD2}; \\ \underline{Y}_{00} &= \underline{Y}_0 + \underline{Y}_{S0} + \underline{Y}_{BD0}, \end{aligned} \tag{4}$$

где $\underline{Y}_1; \underline{Y}_2; \underline{Y}_0$ – комплексные проводимости прямой, обратной и нулевой последовательностей, включающие параметры системы электропитания соответствующих последовательностей (линии 10 кВ силового трансформатора, линии 0,4 кВ);

$\underline{Y}_{S1}; \underline{Y}_{S2}$ – комплексные проводимости трёхфазной симметричной нагрузки, подключаемой в узле нагрузки;

$\underline{Y}_{BD1}; \underline{Y}_{BD2}; \underline{Y}_{BD0}$ – комплексные проводимости БУ, определяемые по выражениям аналогично формулам [24], в которые к компонентам последовательностей, обусловленных основной частотой, включены дополнительные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, образованных токами ВГС:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{BD1} &= \frac{1}{\left(2 \times \frac{U_{(1)}}{I_{(1)}}\right) \times 7.0714 + \sum \frac{U_{\Sigma(1)}}{I_{\Sigma(1)}}}; \\ \underline{Y}_{BD2} &= \frac{1}{\left(2 \times \frac{U_{(1)}}{I_{(1)}}\right) \times 7.0714 + \sum \frac{U_{\Sigma(2)}}{I_{\Sigma(2)}}}; \\ \underline{Y}_{BD0} &= 2 \times \left(\frac{3 \times I_{(0)}}{U_{(0)}}\right) + \sum \frac{3 \times I_{\Sigma(0)}}{U_{\Sigma(0)}}, \end{aligned} \tag{5}$$

где $I_{(1)}, U_{(1)}, I_{(0)}, U_{(0)}$ – токи и напряжения прямой и нулевой последовательностей основной гармонической составляющей (50 Гц) соответственно;

$I_{\Sigma(1)}, I_{\Sigma(2)}, I_{\Sigma(0)}, U_{\Sigma(1)}, U_{\Sigma(2)}, U_{\Sigma(0)}$ – соответственно, суммы гармонических составляющих токов и напряжений, образующих дополнительные прямую, обратную и нулевую последовательности; их значения определяются по результатам измерения.

В качестве инструмента расчета исследуемых ПНР использован программный комплекс «Unbalance – 3» [8]. В данном программном комплексе введено дополнение соответствующими исходными данными в виде совокупностей модулей и аргументов коэффициентов ВГС токов и напряжений и произведена модернизация алгоритма программы в соответствии с измененными выражениями (5) для параметров БУ. Кроме того, предусмотрено изменение в расчёте потерь в элементах системы электропитания за счёт дополнительных совокупностей ВГС, а также за счет компенсации реактивной мощности.

На рисунке 9 представлены диаграммы изменения симметричных компонентов токовой нагрузки, обусловленных изменением основной гармоники и ВГС.

Анализ диаграмм (рисунок 9 а) показал, что среднее значение тока прямой последовательности основной частоты составило 31,35 А. При этом значение тока обратной последовательности $I_{(2)}$ составляет 28,3 % тока $I_{(1)}$ (8,85 А), а значение тока нулевой последовательности $I_{(0)}$ – 49,9% (15,64 А). Дополнительные прямая, обратная и нулевая последовательности, обусловленные эмиссией ВГС токов $I_{(7)}, I_{(5)}$ и $I_{(3)}$ соответственно составили 6,5 % (2,04 А), 4,33% (1,36 А) и 1,67 % (0,52 А). Гармоники токов иных порядков не учитывались, поскольку их значение не превышает 1 % тока основной частоты. Несмотря на незначительную величину токов ВГС, токи обратной и нулевой последовательностей основной частоты достаточно велики, что отчетливо проявляется при анализе коэффициента потерь, обусловленного всеми компонентами прямой, обратной и нулевой последовательностей (рисунок 10).

Как видно из графика (рисунок 10), коэффициент потерь достигает значительной величины, и его усредненное значение составило 5,5. Это означает, что по сравнению с потерями обусловленными только токами прямой последовательности, реальное значение потерь превышает их в 5,5 раз.

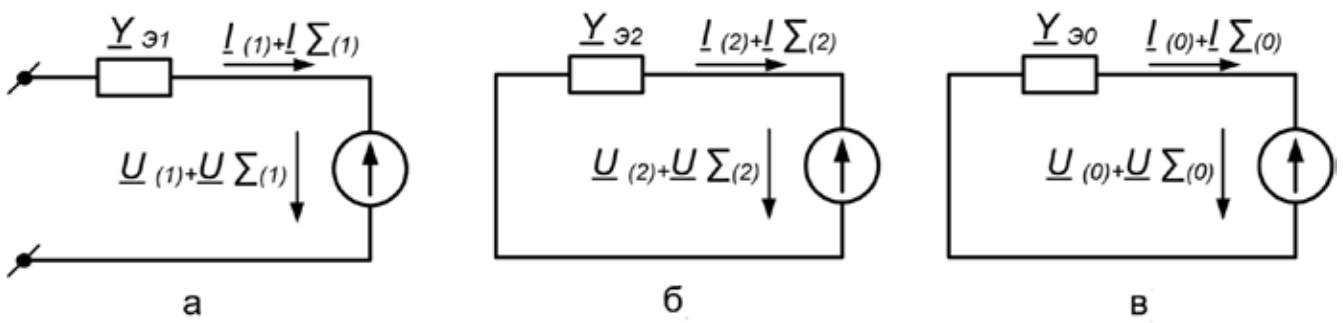


Рисунок 8 – Эквивалентные схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой последовательности (в) исследуемой системы электроснабжения

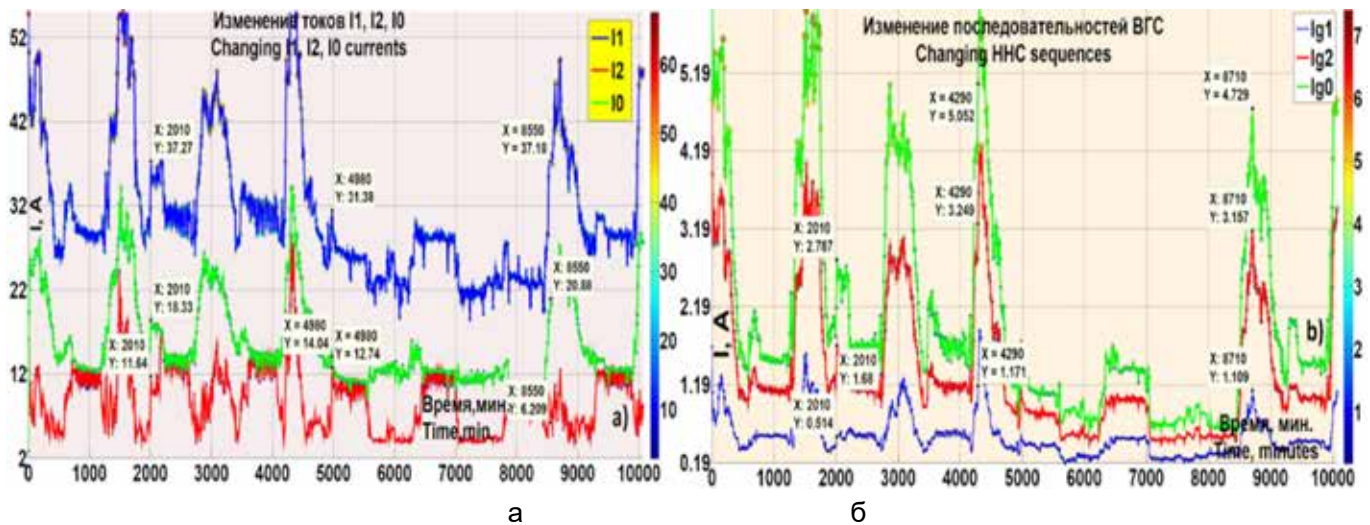


Рисунок 9 – Изменение компонентов симметричных составляющих токов основной частоты (а) и ВГС (б)



Рисунок 10 – Изменение коэффициента потерь мощности в исследуемой системе электроснабжения

Аналогично коэффициенту потерь происходит снижение и реальных потерь в элементах электрической сети (линия низкого напряжения от РП до шин 0,4 кВ силового трансформатора и силовой трансформатор – рисунок 11).

В результате анализа диаграмм (рисунок 11) установлено, что снижение потерь полной мощности в исследуемой сети при включении БУ составит 78,3 % (с 28,83 кВА до 6,26 кВА). То есть снижение потерь полной мощности в десятиминутном

промежутке составило 22,57 кВА. По данным проведенных измерений, усредненное значение коэффициента активной мощности составило 0,98. При условии, что электропотребление в университете останется на таком же уровне в течение года, ежегодное снижение потерь электроэнергии при работе БУ составит 1 162 553 кВт.

Эффективность влияния БУ на некоторые ПНР представлена на рисунке 12.

Анализ рисунка 12 показал, что коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности и установившееся отклонение напряжения не превышают норм качества ЭЭ, установленных ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [2]. Это вполне объяснимо, поскольку участок линии низкого напряжения от шин силового трансформатора до распределительного устройства, где устанавливалось средство измерения и имитируется подключение БУ, имеет незначительную протяженность. Наиболее показательным является контроль данных параметров в узлах потребления на территории

университета. Вместе с этим эффективность балансировки предлагаемого устройства отчетливо проявляется в снижении указанных показателей при включении БУ: коэффициент K_{OU} снижается на 83 % (с 0,64 до 0,1 %), а δU – на 69,2 % (с 5,23 до 1,61 %).

Как показали произведенные расчеты, использование батареи конденсаторов для целей компенсации реактивной мощности не требуется, поскольку расчетное значение требуемой мощности компенсирующего устройства на протяжении всего периода измерения имеет отрицательное значение, следовательно, подключение БК приведет к увеличению потерь активной мощности.

В целом, применение разработанного балансирующего устройства для целей компенсации дополнительных потерь и улучшения показателей качества электрической энергии повышает эффективность его использования.

В таблице представлены итоговые результаты интеграции имитационной модели предлагаемого балансирующего устройства в исследуемую систему электроснабжения университета.

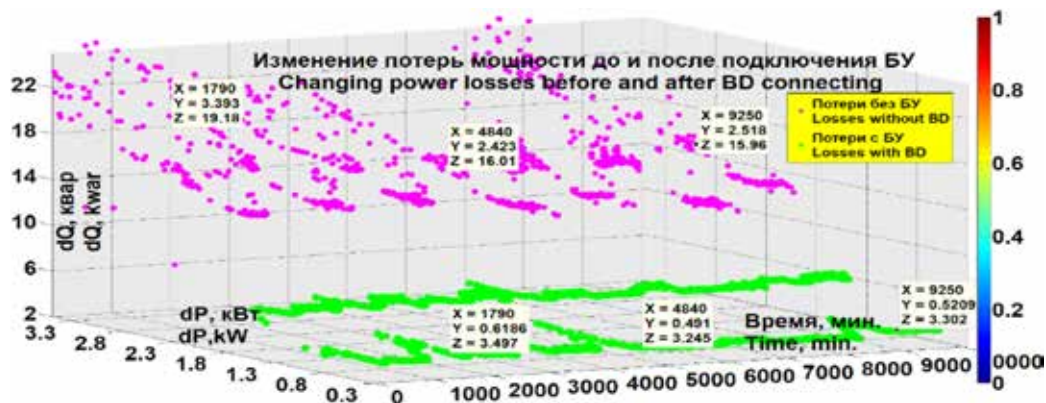


Рисунок 11 – Диаграмма изменения потерь мощности до и после подключения БУ в исследуемой электрической сети

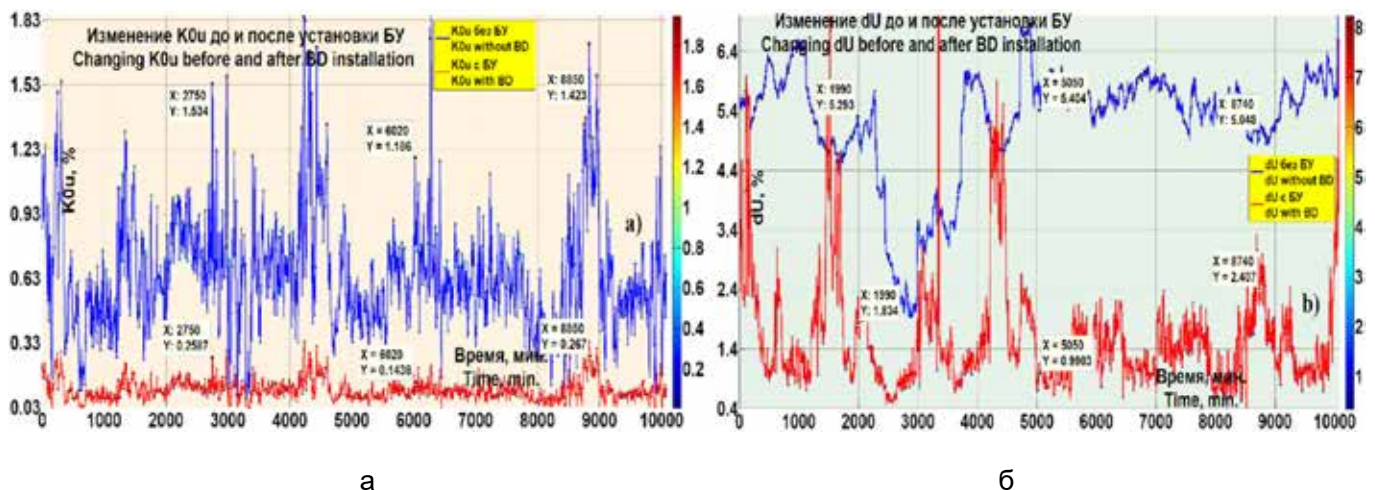


Рисунок 12 – Диаграммы изменения ПНР в исследуемой сети: а) коэффициента K_{OU} , б) показателя

Таблица – Результаты интегрирования имитационной модели балансирующего устройства в исследуемую систему электроснабжения

Значения исследуемых показателей в сети без БУ			Значения исследуемых показателей в сети при включении БУ		
KOU, %	,%	Потери полной мощности, кВА	KOU, %		Потери полной мощности, кВА
0,64	5,23	28,83	0,1	1,61	6,26

Заключение. На основании проведенных исследований установлено, что различные группы электроприемников, в зависимости от их хозяйственной направленности, в силу специфики их функционирования, а также условий размещения и эксплуатации, создают нефункциональные потоки токовой нагрузки, обусловленные несимметрично-несинусоидальными режимами электропотребления. Несбалансированные потоки в значительной степени искажают нормы качества электрической энергии и создают дополнительные потери электрической энергии. Наиболее эффективным техническим средством, минимизирующим эти потоки, может служить предлагаемое балансирующее устройство, которое в автоматическом режиме, без сложных средств управления позволяет исключать несбалансированные потоки из общей электромагнитной среды электропотребления. На основе произведенного имитационного моделирования и расчетов с использованием разработанных методов и программного обеспечения этих расчетов позволили продемонстрировать эффективность предлагаемого технического решения по нормализации режимов работы низковольтных систем электроснабжения. Эффективность балансировки предлагаемого устройства превышает 70 %.

Список источников

1. Наумов И.В., Подъячих С.В. Разработка технических средств для оценки и минимизации последствий несбалансированных режимов в низковольтных электрических сетях // Системные исследования в энергетике 2023: материалы IV Международной конференции. Иркутск, 2023. С. 148-150.
2. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
3. Наумов И.В. Повышение эффективности электропотребления в условиях изменяющегося качества электрической энергии // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 16. № 5. С. 559-574. EDN: EJXZHF.
4. Наумов И.В., Федоринова Э.С., Якупова М.А. Минимизация последствий искажения электрической энергии при несимметрично-несинусоидальном электропотреблении // Промышленная энергетика. 2023. № 3. С. 52-61. EDN: YQTRAK.

5. Матвиенко В.А. Основы теории цепей: учебное пособие для вузов. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016. 162 с. EDN: XCUZIV.

6. Коверникова Л.И. Централизованное снижение уровня высших гармоник в сети с нелинейными нагрузками с помощью пассивных фильтров // Электричество. 2010. № 9. С. 50-55. EDN: MUGWJZ.

7. Наумов И.В. Устройство для снижения потерь в электрических сетях с нелинейно-несимметричной нагрузкой // Электричество. 2023. № 6. С. 57-66. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-6-57-66. EDN: FJYVCA.

8. Наумов И.В. «Unbalance – 3». Программа расчёта несбалансированных режимов работы низковольтных электрических сетей: № 2023682840; заявл. 01.11.2023; опублик. 13.11.2023. EDN: KSVWQC.

9. ГОСТ 30804.4.30-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерения показателей качества электрической энергии. М.: Стандартинформ, 2020. 69 с.

10. Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review / D. Lumbreras [et al.] // Energies. 2020. № 13 (21). P. 5792. DOI: 10.3390/en13215792.

11. Результаты анализа качества и безопасности электроэнергии на производственном объекте / С.М. Оськин [и др.] // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2017. № 4 (32). С. 149-155. EDN: RYSQBE.

12. Коновалов Ю.В., Воробьев И.И. Анализ качества электроэнергии на предприятии // Вестник Ангарской государственной технической академии. 2014. № 8. С. 57-60. EDN: TAVLDP.

13. Амеликина Н.А., Бодрухина С.С., Цырук С.А. Определение фактического вклада искажения качества электрической энергии в точке общего присоединения от несимметричных потребителей // Электрика. 2005. № 4. С. 17-21.

14. Power Quality: Scientific Collaboration Networks and Research Trends / G. Francisco [et al.] // Energies. 2018. № 11 (8). P. 2067. DOI: 10.3390/en11082067.

15. Абдиева З.Э., Назаров Б.Б. Причины возникновения несимметричных режимов в электрических сетях 0,38кВ // Наука и инновационные технологии. 2017. № 1 (3). С. 64-67. EDN: YMGZTU.

16. Козловская В.Б., Калечиц В.Н. Несимметричные режимы работы линий наружного освещения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объ-

единений СНГ. 2019. Т. 62. № 3. С. 232-246. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246. EDN: AUDEMW.

17. Костюков Д.А. Оценка вклада потребителя в несимметрию напряжений по нулевой последовательности в точке общего присоединения // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2018. № 6 (69). С. 24-34. DOI: 10.37493/2307-907X-2018-69-6-24-34. EDN: YWPRNJ.

18. Килин С.В., Вендин С.В. Анализ несинусоидальности и несимметрии в электрических сетях 0,4-10 кВ // Проблемы электрификации сельского хозяйства: сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. Ярославль, 2018. С. 15-21. EDN: XNIJZJ.

19. Analysis of unbalanced load low-voltage electrical networks operating modes / I.V. Naumov [et al.] // E3S Web of Conferences: International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2021). 2021. Vol. 295. P. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202129502005. EDN: FTGQEC.

20. Наумов И.В. К вопросу управления несимметричными режимами работы распределительных электрических сетей 0,38 кВ // Промышленная энергетика. 2022. № 5. С. 2-14. DOI: 10.34831/EP.2022.25.51.001. EDN: MSKKDT.

21. Naumov I.V. An Analysis of Fires Due to Violation of the Rules for Design and Operation of Electrical Plants, and How to Prevent them in Residential Buildings (on the Example of the Amur Region) // International Science and Technology Conference «EastConf» INSPEC. 2019. DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725407.

22. Reply to "Comment on 'Origin of symmetry-forbidden high-order harmonic generation in the time-dependent Kohn-Sham formulation'" / X. Zang [et al.] // Physical Review A. 2022. № 105 (4). DOI 10.1103/physreva.105.047102.

23. Наумов И.В. Устройство для снижения потерь в электрических сетях с нелинейно-несимметричной нагрузкой // Электричество. 2023. № 6. С. 57-66. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-6-57-66. EDN: FJYVCA.

24. Наумов И.В., Подъячих С.В., Третьяков А.Н. Управление потоками высших гармонических составляющих в цеховых электрических сетях промышленных предприятий // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2023. Т. 8. № 3 (33). С. 115-124. DOI: 10.25744/genb.2023.33.3.016. EDN: MCNCCG.

References

1. Naumov I.V., Podyachikh S.V. Razrabotka tekhnicheskikh sredstv dlya otsenki i minimizatsii posledstviy nesbalansirovannykh rezhimov v nizkovol'tnykh elektricheskikh setyakh [Development of technical means for assessing and minimizing the consequences of unbalanced modes in low-voltage

electrical networks]. Proceedings of the IV International Conference «System Research in Energy 2023». Irkutsk; 2023: 148-150. (In Russ).

2. GOST 32144-2013 Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems]. M.: Standartinform; 2014: 16. (In Russ).

3. Naumov I.V. Povyshenie effektivnosti elektropotrebleniya v usloviyakh izmenyayushchegosya kachestva elektricheskoi energii [Increasing the efficiency of power consumption in conditions of changing quality of electrical energy]. *Journal of siberian federal university. Engineering and technologies*. 2023; (16-5): 559-574. EDN: EJXZHF. (In Russ).

4. Naumov I.V., Fedorinova E.S., Yakupova M.A. Minimizatsiya posledstviy iskazheniya elektricheskoi energii pri nesimmetrichno-nesinusoidal'nom elektropotreblenii [Minimizing the consequences of electrical energy distortion with asymmetrical-non-sinusoidal power consumption]. *Promyshlennaya energetika*. 2023; (3): 52-61. EDN: YQTRAK. (In Russ).

5. Matvienko V.A. *Osnovy teorii tsepei: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fundamentals of circuit theory: a textbook for universities]. Ekaterinburg: UMTs UPI; 2016: 162. EDN: XCUZIV. (In Russ).

6. Kovernikova L.I. Tsentralizovannoe snizhenie urovnya vysshikh garmonik v seti s nelineinymi nagruzkami s pomoshch'yu passivnykh fil'trov [Centralized reduction of the level of higher harmonics in a network with nonlinear loads using passive filters]. *Elektrichestvo*. 2010; (9): 50-55. EDN: MUGWJZ. (In Russ).

7. Naumov I.V. Ustroystvo dlya snizheniya poter' v elektricheskikh setyakh s nelineino-nesimmetrichnoi nagruzkoi [Device for reducing losses in electrical networks with nonlinear and asymmetrical loads]. *Elektrichestvo*. 2023; (6): 57-66. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-6-57-66. EDN: FJYVCA. (In Russ).

8. Naumov I.V. «Unbalance – 3». Programma rascheta nesbalansirovannykh rezhimov raboty nizkovol'tnykh elektricheskikh setei: № 2023682840 [«Unbalance - 3». Program for calculating unbalanced operating modes of low-voltage electrical networks: No. 2023682840]. application 01 november 2023; published 13 november 2023. EDN: KSVWQC. (In Russ).

9. GOST 30804.4.30-2013 Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniya pokazatelei kachestva elektricheskoi energii [Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Methods for measuring electrical energy quality indicators]. M.: Standartinform; 2020: 69. (In Russ).

10. Lumberras D. et al. Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review. *Energies*. 2020; (13-21): 5792. DOI: 10.3390/en13215792.

11. Oskin S.M. Rezul'taty analiza kachestva i bezopasnosti elektroenergii na proizvodst-

vennom objekte [Results of analysis of the quality and safety of electricity at a production facility]. *Chrezvychainye situatsii: promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost'*. 2017; (4-32): 149-155. EDN: RYSQBE. (In Russ).

12. Konovalov Yu.V., Vorobyov I.I. Analiz kachestva elektroenergii na predpriyatii [Analysis of power quality at the enterprise]. *Vestnik Angarskoi gosudarstvennoi tekhnicheskoi akademii*. 2014; (8): 57-60. EDN: TAVLDP. (In Russ).

13. Amelkina N.A., Bodrukhina S.S., Tsyruk S.A. Opredelenie fakticheskogo vklada iskazheniya kachestva elektricheskoi energii v tochke obshchego prisoedineniya ot nesimmetrichnykh potrebitel'ei [Determination of the actual contribution of distortion in the quality of electrical energy at the point of common connection from asymmetrical consumers]. *Elektrika*. 2005; (4): 17-21. (In Russ).

14. Francisco G. et al. Power Quality: Scientific Collaboration Networks and Research Trends. *Energies*. 2018; (11-8): 2067. DOI: 10.3390/en11082067.

15. Abdieva Z.E., Nazarov B.B. Prichiny vozni knoveniya nesimmetrichnykh rezhimov v elektricheskikh setyakh 0,38kV [Reasons for the occurrence of asymmetrical modes in 0.38 kV electrical networks]. *Science and innovative technologies*. 2017; (1-3): 64-67. EDN: YMGZTU. (In Russ).

16. Kozlovskaya V.B., Kalechits V.N. Nesimmetrichnye rezhimy raboty linii naruzhnogo osveshcheniya [Asymmetrical operating modes of outdoor lighting lines]. *Energetika. Proceedings of cis higher education institutions and power engineering associations*. 2019; (62-3): 232-246. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246. EDN: AUDEMW. (In Russ).

17. Kostyukov D.A. Otsenka vklada potrebitelya v nesimetriyu napryazhenii po nulevoi posledovatel'nosti v tochke obshchego prisoedineniya [Assessment of the consumer's contribution to voltage asymmetry based on the zero sequence at the point of common connection]. *Newsletter of North-Caucasus federal university*. 2018; (6-69): 24-34. DOI: 10.37493/2307-907X-2018-69-6-24-34. EDN: YWPRNJ. (In Russ).

18. Kilin S.V., Vendin S.V. Analiz nesinusoidal'nosti i nesimetrii v elektricheskikh setyakh 0,4-10 kV [Analysis of non-sinusoidality and asymmetry in electrical networks 0.4-10 kV]. Collection of scientific papers based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference «Problems of electrification of agriculture». Yaroslavl; 2018: 15-21. EDN: XNIJZJ. (In Russ).

19. Naumov I.V. et al. Analysis of unbalanced load low-voltage electrical networks operating modes. *E3S Web of Conferences: International Scientific Forum on Sustainable Development*

and Innovation (WFSDI 2021). 2021; (295): 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202129502005. EDN: FTGQEC.

20. Naumov I.V. K voprosu upravleniya nesimmetrichnymi rezhimami raboty raspredelitel'nykh elektricheskikh setei 0,38 kV [On the issue of managing asymmetrical operating modes of 0.38 kV electrical distribution networks]. *Promyshlennaya energetika*. 2022; (5): 2-14. DOI: 10.34831/EP.2022.25.51.001. EDN: MSKKDT. (In Russ).

21. Naumov I.V. An Analysis of Fires Due to Violation of the Rules for Design and Operation of Electrical Plants, and How to Prevent them in Residential Buildings (on the Example of the Amur Region). *International Science and Technology Conference «EastConf» INSPEC*. 2019. DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725407.

22. Zang X. et al. Reply to "Comment on 'Origin of symmetry-forbidden high-order harmonic generation in the time-dependent Kohn-Sham formulation'". *Physical Review A*. 2022; (105-4). DOI 10.1103/physreva.105.047102.

23. Naumov I.V. Ustroistvo dlya snizheniya pot'er v elektricheskikh setyakh s nelineino-nesimmetrichnoi nagruzkoi [Device for reducing losses in electrical networks with nonlinear and asymmetrical loads]. *Elektrichestvo*. 2023; (6): 57-66. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-6-57-66. EDN: FJYVCA. (In Russ).

24. Naumov I.V., Podyachikh S.V., Tretyakov A.N. Upravlenie potokami vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh v tsekhovykh elektricheskikh setyakh promyshlennykh predpriyatii [Control of flows of higher harmonic components in workshop electrical networks of industrial enterprises]. *Grozny natural science bulletin*. 2023; (8-3-33): 115-124. DOI: 10.25744/genb.2023.33.3.016. EDN: MCNCCG. (In Russ).

Информация об авторах

И.В. Наумов – доктор технических наук, профессор; AuthorID 168795.

С.В. Подъячих – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 411005.

Information about the author

I.V. Naumov – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 168795.

S.V. Podyachikh – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 411005.

Статья поступила в редакцию 16.01.2024; одобрена после рецензирования 05.03.2024; принята к публикации 19.03.2024.

The article was submitted 16.01.2024; approved after reviewing 05.03.2024; accepted for publication 19.03.2024.