

EDN: EJXZHF

УДК 621.311

Improving the Efficiency of Electricity Consumption in Changing Power Quality Conditions

Igor V. Naumov*

*Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russian Federation*

*Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Yezhevsky
Irkutsk, Russian Federation*

Received 01.03.2023, received in revised form 21.06.2023, accepted 03.07.2023

Abstract. This study is devoted to the analysis of existing electrical network operating modes that provide power to various groups of consumers. It is established that the different nature of power consumption leads to a significant change in the standards of the power quality, the violation of which is accompanied by significant energy costs and violates the conditions of technical means electromagnetic compatibility in a single electromagnetic environment. A new technical means of minimizing these violations consequences is proposed. Methods and software tools have been developed for calculating the power quality indicators in the absence and use of means to minimize these distortions. Simulation modeling of the developed technical means influence on the quality norms of electric energy and energy losses in a real operating low-voltage electric network feeding a gas station located in rural areas is presented. The efficiency of the proposed technical solution is analyzed.

Keywords: power quality, higher harmonic components, power losses, universal balancing device.

Citation: Naumov, I. V. Improving the efficiency of electricity consumption in changing power quality conditions. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(5), 559–574. EDN: EJXZHF



Повышение эффективности электропотребления в условиях изменяющегося качества электрической энергии

И. В. Наумов

*Иркутский национальный
Исследовательский технический университет
Российская Федерация, Иркутск
Иркутский государственный
аграрный университет имени А. А. Ежовского
Российская Федерация, Иркутск*

Аннотация. Это исследование посвящено анализу режимов работы действующих электрических сетей, осуществляющих питание различных групп потребителей. Установлено, что различный характер электропотребления приводит к существенному изменению норм качества электрической энергии, несоблюдение которых сопровождается значительными энергетическими затратами и нарушает условия электромагнитной совместимости технических средств в единой электромагнитной среде. Предложено новое техническое средство минимизации последствий указанных нарушений. Разработаны методы и программные расчеты показателей качества электрической энергии в условиях отсутствия и применения средства минимизации указанных искажений. Представлено имитационное моделирование влияния разработанного технического средства на нормы качества электрической энергии и энергетические потери в реальной действующей электрической сети низкого напряжения, питающей автозаправочную станцию, расположенную в сельской местности. Произведен анализ эффективности предлагаемого технического решения.

Ключевые слова: качество электроэнергии, высшие гармонические составляющие, потери электроэнергии, универсальное балансирующее устройство.

Цитирование: Наумов И. В. Повышение эффективности электропотребления в условиях изменяющегося качества электроэнергии / И. В. Наумов. Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(5). С. 559–574. EDN: EJXZHF

Введение

Характерной особенностью современных систем электроснабжения является обеспечение электрической энергией групп электроприемников, имеющих новейшую элементную базу, которая в силу специфики функционирования этих элементов способна изменять условия взаимодействия многочисленных электроприемников в единой электромагнитной среде, в основном за счет эмиссии высших гармонических составляющих (ВГС) токов и напряжений. При этом на характер таких взаимодействий накладывается и отпечаток нефункционального распределения отдельных электроприемников в трёхфазной системе электропитания. Указанные предпосылки являются основной причиной нарушения электромагнитной совместимости всех технических средств, взаимодействующих в единой электрической сети при выполнении своих функций. Последствия этих нарушений приводят к следующим событиям:

– нарушению установленных норм качества электрической энергии, что влечет за собой изменение эксплуатационных характеристик оборудования;

- возникновению дополнительных потерь электрической энергии;
- снижению уровня надежности;
- созданию условий возникновения пожаров.

Сертификация электрической энергии как товара основывается на соблюдении определённых норм, устанавливаемых государственными стандартами разных стран [1–6]. Вместе с этим следует признать, что в реальных условиях электропотребления нарушение принятых норм качества (НК) носит объективный характер, и их соблюдение требует разработки и применения новых, а также совершенствования существующих способов и технических средств, предотвращающих последствия нарушения НК.

Следует отметить серьезное внимание мировой научной общественности к вопросам исследования измененных режимов работы электрических сетей различной хозяйственной направленности (промышленность, сельское хозяйство, коммунально-бытовое обеспечение). В связи с этим исследованию режимов работы электрических сетей, в условиях изменённых НК, а также способам и средствам, повышающим качество электроэнергии, посвящено много авторских исследований [7–26].

Целью статьи является исследование режимов работы действующей электрической сети низкого напряжения, питающей один из объектов на территории сельской местности Иркутской области, Россия. Для достижения указанной цели поставлен ряд задач, решение которых позволило представить реальную картину электропотребления в условиях изменённых НК электроэнергии. **Задачи:** методы и модели оценки режимов, характеристика объекта и инструментальной базы исследования, разработка новых технических средств, результаты исследований и рекомендации.

Методы, модели, средства и инструменты исследования

Как было отмечено выше, основными причинами изменения НК электрической энергии (ЭЭ), обусловленных искаженным электропотреблением, являются генерация ВГС и несимметрия трёхфазной системы напряжения. Указанные причины вызывают изменение следующих показателей, устанавливаемых государственным стандартом [1]:

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

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

где K_{2u} и K_{0u} – коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательностям напряжения соответственно; $\delta U_{(-)}$, $\delta U_{(+)}$ – соответственно отрицательное и положительное установившиеся отклонения напряжения; U_1 , U_2 , U_0 – симметричные составляющие напряжения соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностям напряжения электропитания; $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_n и большие U_n соответственно усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями [1]; U_n – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению U_{nom} или согласованному напряжению U_c ; $U_{(n)}$ – напряжение гармонической составляющей до 40-го порядка; $U_{(1)}$ – напряжение основной гармонической составляющей.

При этом нарушение качества электрической энергии, оцениваемое изменением напряжения электропитания, безусловно, является следствием флуктуаций токовой нагрузки, увеличение которой приводит к возрастанию непроизводительных потерь мощности и энергии в целом. Наиболее достоверным критерием увеличения потерь мощности при несбалансированном электропотреблении (несимметрично-несинусоидальный режим) может служить коэффициент потерь мощности:

$$K_P = \frac{\Delta P_{UNB.}}{\Delta P_{BAL.}} = 1 + \left(\sum K_{1ni} \right)^2 + \left(K_{2(1)i} + \sum K_{2ni} \right)^2 + K_R \cdot \left(K_{0(1)i} + \sum K_{0ni} \right)^2, \quad (2)$$

где $\Delta P_{UNB.}$ – потери активной мощности, обусловленные прямой, обратной и нулевой последовательностями, как основной частоты напряжения электропитания, так и токами ВГС; $\Delta P_{BAL.}$ – потери активной мощности, обусловленные только токами прямой последовательности (ПП) основной частоты; $\sum K_{1ni}$, $\sum K_{2ni}$, $\sum K_{0ni}$ – суммарные коэффициенты дополнительных прямой, обратной и нулевой последовательностей соответствующих совокупностей токов ВГС. То есть:

$$\begin{aligned} \sum K_{1ni} &= \frac{I_4 + I_7 + I_{10} + I_{13} + I_{16} + \dots}{I_{1(1)}}; \\ \sum K_{2ni} &= \frac{I_2 + I_5 + I_8 + I_{11} + I_{14} + \dots}{I_{1(1)}}; \\ \sum K_{0ni} &= \frac{I_3 + I_6 + I_9 + I_{12} + I_{15} + \dots}{I_{1(1)}}. \end{aligned} \quad (3)$$

$K_{2(1)i} = \frac{I_{2(1)}}{I_{1(1)}}$ – коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности (ОП);

$K_{0(1)i} = \frac{I_{0(1)}}{I_{1(1)}}$ – коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности (НП); $I_{1(1)}$, $I_{2(1)}$,

$I_{0(1)}$ – симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательностей основной частоты соответственно.

В дальнейшем будем называть показатели, определяемые по выражениям (1) и (2), показателями несбалансированности (ПН).

Определение симметричных составляющих токов и напряжений соответствующих последовательностей основной частоты, а также токов и напряжений дополнительных прямой, обратной и нулевой последовательностей, образованных совокупностями ВГС токов, можно определить по показаниям сертифицированных приборов, которые регистрируют изменение указанных показателей при проведении измерений.

В качестве технического средства минимизации несбалансированных режимов и соответствующих сокращения потерь и повышения качества электрической энергии предлагается использовать универсальное балансирующее устройство (УБУ), представляющее собой комбинацию электромагнитного устройства с подвижными сердечниками, обмотки которого соединены по схеме встречного зигзага и фильтров токов ОП и ПП (рис. 1).

Электромагнитная часть УБУ (рис. 2) представляет собой трёхфазный трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 1, первичная и вторичная обмотки которого соединены по схеме встречного зигзага. При отсутствии НП ЭМУ занимает положение, показанное на рис. 2а. При возникновении тока НП в обмотках 4 и 5 появляется магнитное поле,

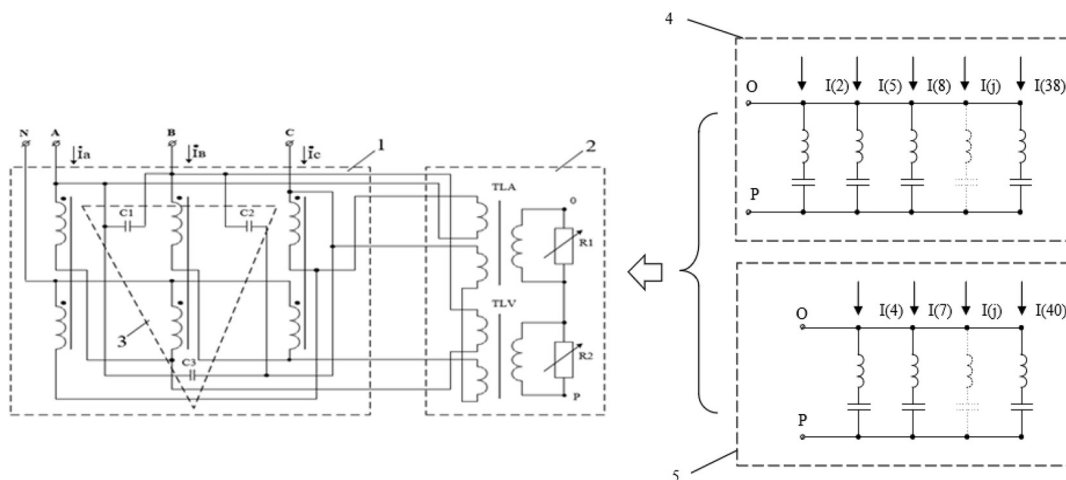


Рис. 1. Универсальное балансирующее устройство (УБУ): 1 – электромагнитная часть (ЭМУ); 2 – фильтр ОП (ПП); 3 – батарея конденсаторов; 4 – блок УРФ ОП; 5 – блок УРФ ПП

Fig. 1. Universal balancing device (UBD): 1 – electromagnetic part (EMD); 2 – NS filter (PS); 3 – capacitor bank; 4 – N-BRF NS unit; 5 – N-BRF PS unit

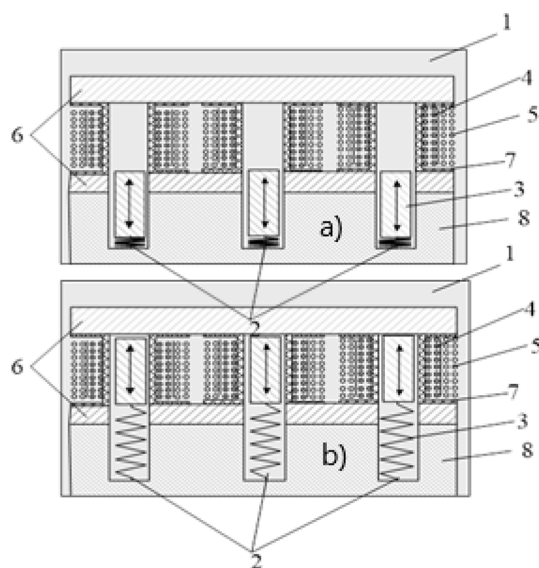


Рис. 2. Электромагнитное устройство: а) – отсутствие нулевой последовательности; б) – максимальный поток нулевой последовательности: 1 – корпус, 2 – пружины, 3 – подвижные сердечники, 4 – первичная обмотка, 5 – вторичная обмотка, 6 – магнитопровод, 7 – катушка индуктивности, 8 – основание

Fig. 2. Electromagnetic device: a) – zero sequence absence; b) – maximum flow of zero sequence: 1 – housing, 2 – springs, 3 – movable cores, 4 – primary winding, 5 – secondary winding, 6 – magnetic circuit, 7 – inductor, 8 – base

которое создает наводящую электродвижущую силу (ЭДС) в сердечниках 3. Подвижные сердечники 3 в соответствии с законом электромагнитной индукции, растягивая пружины 2, поднимаются вверх. НП токов, образованная током основной частоты и токами ВГС, кратными трём, в этом случае будет расходоваться на потокосцепление и удержание сердечника. Положение подвижного сердечника зависит от силы тока НП, что определяется уровнем несбалансированности тока в сети. При увеличении НП увеличивается энергия электромагнитного поля, вызывая уменьшение общего реактивного сопротивления НП ЭМУ, и создается колебательный контур для НП. При максимальном значении НП сердечники занимают положение, показанное на рис. 2б. При снижении тока НП магнитная энергия уменьшается, что уже приводит к снижению индуктивности, и сердечники 3 под действием пружин 2 вновь возвращаются в положение, соответствующее уровню токов НП. В результате осуществляется процесс поглощения НП за счет саморегулирования индуктивности ЭМУ. Фильтр тока ОП (рис. 1, 2) состоит из измерительного трансформатора тока (TLA) и трансреактора (TLV) [27]. Первичный ток трансформатора тока TLA совпадает с вторичным током по фазе, следовательно, напряжение на R_1 будет совпадать по фазе с первичным током. Фаза вторичного тока трансреактора TLV зависит от вторичной нагрузки R_2 . Сопротивления резисторов R_1 и R_2 подобраны так, чтобы напряжение $U_{R1} = (\dot{I}_C - \dot{I}_A) \cdot R_1$ совпадало по фазе с током $(\dot{I}_C - \dot{I}_A)$. При этом $U_{R2} = (\dot{I}_B - \dot{I}_C) \cdot R_2 \cdot e^{j\frac{\pi}{3}}$ будет опережать ток $(\dot{I}_B - \dot{I}_C)$ на угол $\pi/3$ (рис. 3а). При подведении к фильтру ОП токов ПП напряжение U_{OP} (рис. 1) будет равно нулю, поскольку векторы напряжений U_{R1} и U_{R2} противоположны по направлению. Если же на вход фильтра ОП подается совокупность токов ОП, то векторы напряжений сместятся относительно друг друга на угол $\pi/3$ и на выходе фильтра появится значительное напряжение $U_{OP} = \sqrt{3} \cdot (\dot{I}_{2C} - \dot{I}_{2A}) \cdot R_1 \cdot e^{-j\pi/6}$ (рис. 3б). Таким образом, если в токах, подводимых к фильтру, содержатся составляющие прямой и обратной последовательностей, то на выходе фильтра появляется напряжение, пропорциональное только току обратной последовательности. И если к зажимам “О” и “Р” присоединить блок параллельно собранных узкополосных резонансных фильтров (УРФ) (рис. 1, 4), каждый из которых настроен в резонанс именно своей составляющей из общего потока обратной последовательности, будут создаваться области фильтрации указанных ВГС. Если трансформатор тока включить на разность токов $\dot{I}_B - \dot{I}_A$ и трансреактор на разность токов $\dot{I}_C - \dot{I}_B$ (рис. 4а и 4б), то будет получен фильтр токов прямой последовательности, который будет направлять потоки прямой последовательности на соответствующий блок УРФ ПП (рис. 1, 5). Количество фильтров в блоках УРФ ОП и ПП определяется процентным соотношением соответствующих совокупностей дополнительных прямой и обратной последовательностей токов к току основной частоты.

Для определения симметричных составляющих токов и напряжений основной частоты и соответствующих показателей, образованных совокупностями ВГС, при условии подключения в электрической сети предлагаемой модели КБУ составляются эквивалентные схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 5):

На схемах рис. 5 обозначено: $\underline{Y}_{S1} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_{S1} + \underline{Y}_{UBD1}$; $\underline{Y}_{S2} = \underline{Y}_2 + \underline{Y}_{S2} + \underline{Y}_{UBD2}$; $\underline{Y}_{S0} = \underline{Y}_0 + \underline{Y}_{UBD0}$ – соответствующие комплексные проводимости прямой, обратной и нулевой последовательностей; \underline{Y}_1 , \underline{Y}_2 и \underline{Y}_0 – суммарные комплексные проводимости прямой, обратной и нулевой последовательностей, включающие комплексные проводимости элементов электри-

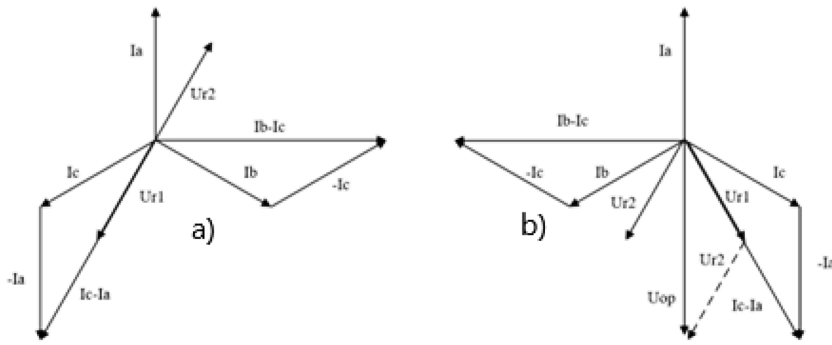


Рис. 3. Векторная диаграмма фильтра тока ОП: а) – для прямой последовательности, б) – для обратной последовательности

Fig. 3. Vector diagram of the NS current filter: a) – for the positive sequence, b) – for the negative sequence

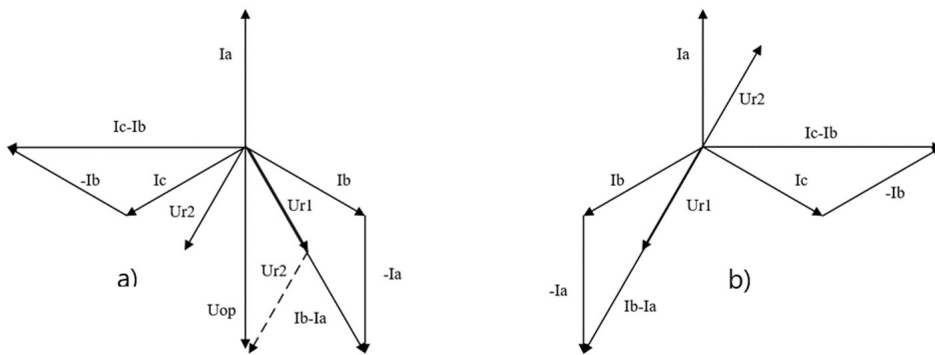


Рис. 4. Векторная диаграмма фильтра тока ПП: а) – для прямой последовательности, б) – для обратной последовательности

Fig. 4. Vector diagram of the PS current filter: a) – for the positive sequence, b) – for the negative sequence

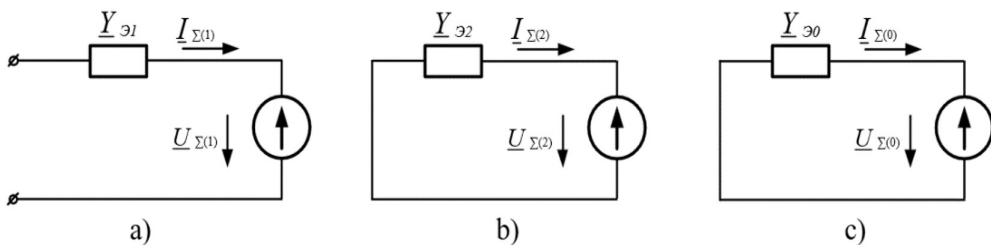


Рис. 5. Эквивалентные схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (с) последовательностей

Fig. 5. Equivalent schemes of the positive (a), negative (b) and zero (c) sequences

ческой сети (линия высокого напряжения, силовой трансформатор, линия низкого напряжения); \underline{Y}_{S1} и \underline{Y}_{S2} – суммарные комплексные проводимости (прямой и обратной последовательностей трёхфазной симметричной нагрузки (двигательная нагрузка). Определение этих параметров достаточно полно изложено в [24]; \underline{Y}_{UBD1} , \underline{Y}_{UBD2} и \underline{Y}_{UBD0} – комплексные проводимости УБУ,

определяемые аналогично методу, изложенному в [28]. С учетом генерации дополнительных последовательностей ВГС эти параметры будут определяться по следующим выражениям:

$$Y_{\text{UBD1}} = \frac{1}{14,1428 \cdot \frac{U_1}{I_1} + \sum \frac{U_{\Sigma(1)}}{I_{\Sigma(1)}}}; Y_{\text{UBD2}} = \frac{1}{14,1428 \cdot \frac{U_1}{I_1} + \sum \frac{U_{\Sigma(2)}}{I_{\Sigma(2)}}};$$

$$Y_{\text{UBD0}} = 6 \cdot \frac{I_1}{U_1} \cdot \sum \frac{I_{\Sigma(0)}}{U_{\Sigma(0)}},$$
(4)

где $I_{(1)}$, $U_{(1)}$ – комплексные значения величин тока и напряжения прямой последовательности основной гармонической составляющей (50 Гц); $I_{\Sigma(1)}$, $I_{\Sigma(2)}$, $I_{\Sigma(0)}$, $U_{\Sigma(1)}$, $U_{\Sigma(2)}$ и $U_{\Sigma(0)}$, – соответственно суммы комплексных значений гармонических составляющих токов и напряжений, образующих дополнительные прямую, обратную и нулевую последовательности. Их значения определяются по результатам измерения соответствующими сертифицированными приборными средствами в действующих электрических сетях.

С учетом выражений (4) и на основании метода, подробно описанного в [24], определяются показатели, характеризующие уровень несбалансированности электропотребления при нарушении качества электрической энергии (выражения 1–2).

В качестве инструмента расчета используется программный комплекс [29], позволяющий производить определение исследуемых показателей при отсутствии и подключении CBD, а также визуализировать изменение этих показателей в любом из режимов, в соответствии с задачами исследования.

Характеристика объекта и приборной базы исследования

Исследования режимов работы действующих электрических сетей низкого напряжения производились на шинах 0,4 кВ трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, мощностью 160 кВА, питающей сельскую автозаправочную станцию, расположенную в Усольском районе Иркутской области, Россия. Расстояние от шин 0,4 кВ подстанции до шин вводно-распределительного устройства (ВРУ), от которого производится распределение ЭЭ по узлам электропотребления, составляет 96 м. Кабель сечением 4х50 мм² имеет следующие параметры. Полные комплексные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательности: $Z_{L1} = Z_{L2} = 0,641 + j0,0793 = 0,6459e^{j7,0516} \text{ Ohms/km}$; $Z_{L0} = 0,493 + j0,0187 = 0,9381e^{j7,9077} \text{ Ohms/km}$. Полные комплексные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей силового трансформатора: $Z_{T1} = Z_{T2} = 0,016 + j0,0417 = 0,045 * e^{j69,04}$; $Z_{T0} = 0,1508 + j0,3670 = 0,397 * e^{j67,70} \text{ Ohm}$. Кроме того, в системе электроснабжения, питающей данный объект, учитывается линия высокого напряжения (10 кВ), питающая силовой трансформатор. Полные комплексные сопротивления прямой (обратной) последовательностей данной ЛЭП, выполненной проводом АС 35, протяженностью 16, 7 км, имеют следующие значения: $Z_{HV1} = Z_{HV2} = 0,0243 + j0,01 = 0,0263e^{j22,37}, \text{ Ohms}$.

В качестве средства измерения использовался сертифицированный прибор Ресурс UF-2М¹ (рис. 6).

¹ Заводской номер 2479. Свидетельство о поверке № С-БП/11–10–2021/101044323. Действительно до 10.10.2023 г.

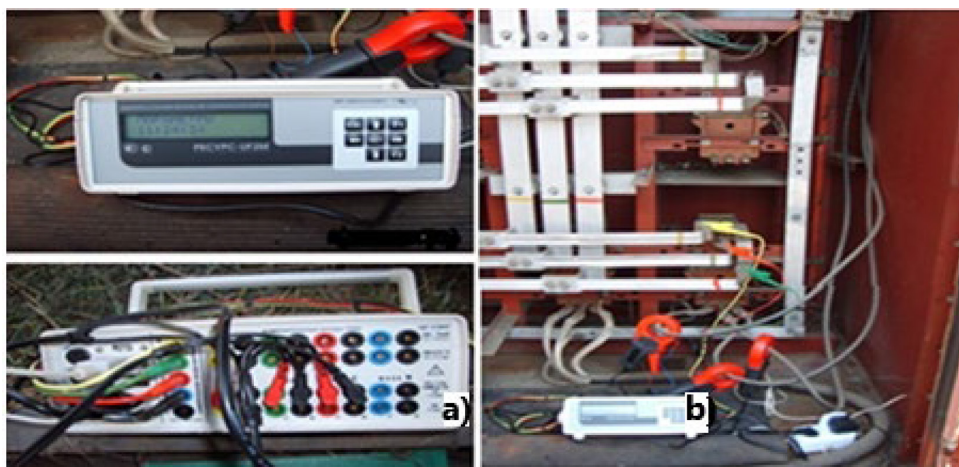


Рис. 6. Прибор «Ресурс-UF 2М» (а) и его подключение к исследуемой сети (b)

Fig. 6. The Resource-UF 2M device (a) and its connection to the network under study (b)

Измерения производились в течение недели с 22 февраля по 01 марта 2022 г. При этом значение каждого показателя усреднялось в 10-минутном промежутке. Всего за период измерения рассмотрено 1008 таких интервала.

Результаты исследования

На рис. 7а представлены изменения токов в исследуемой электрической сети. Как показал анализ представленных диаграмм, наиболее загруженной является фаза «С». Среднее значение² тока в этой фазе составило 10,6 А, в фазе «В» – 4,13 А, в фазе «А» – 1,32 А. Как видно, электропотребление характеризуется весьма значительным уровнем несимметрии фазных токов, что отчетливо проявляется и в диаграммах изменения симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей токов основной частоты (рис. 7в): ток прямой ($I_{1(1)}$) последовательности составил 5,33 А, ток обратной ($I_{2(1)}$) последовательности – 3,58 А (67 %) и ток нулевой ($I_{0(1)}$) последовательности – 2,77 А (52 %). При этом дополнительные последовательности, образованные эмиссией ННС (рис. 5с) токов, представлены следующими гармониками: I_7 – прямая последовательность (23 %), I_5 – обратная последовательность (32 %) и I_3 – нулевая последовательность (34 %). Все остальные гармонические составляющие токов не учитывались, поскольку каждая из них составляет менее 20 % тока основной частоты (расчетами установлено: I_2, I_4, I_8 – по 14 %; I_{10}, I_{12} – по 13 %; I_{11}, I_{13} – по 17 % и I_9 – 18 %). Как видно, значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, образованные как основной частотой, так и токами ННС, весьма значительны. Вследствие этого дополнительные потери энергии, характеризуемые коэффициентом потерь (K_p , выражение 2), также будут достигать значительной величины. На рис. 8 представлены диаграммы изменения коэффициента потерь и других исследуемых ПН, определяемых по выражениям (1) – (2).

² Здесь и далее по тексту величина каждого показателя принимается как его усредненное значение за период наблюдения.

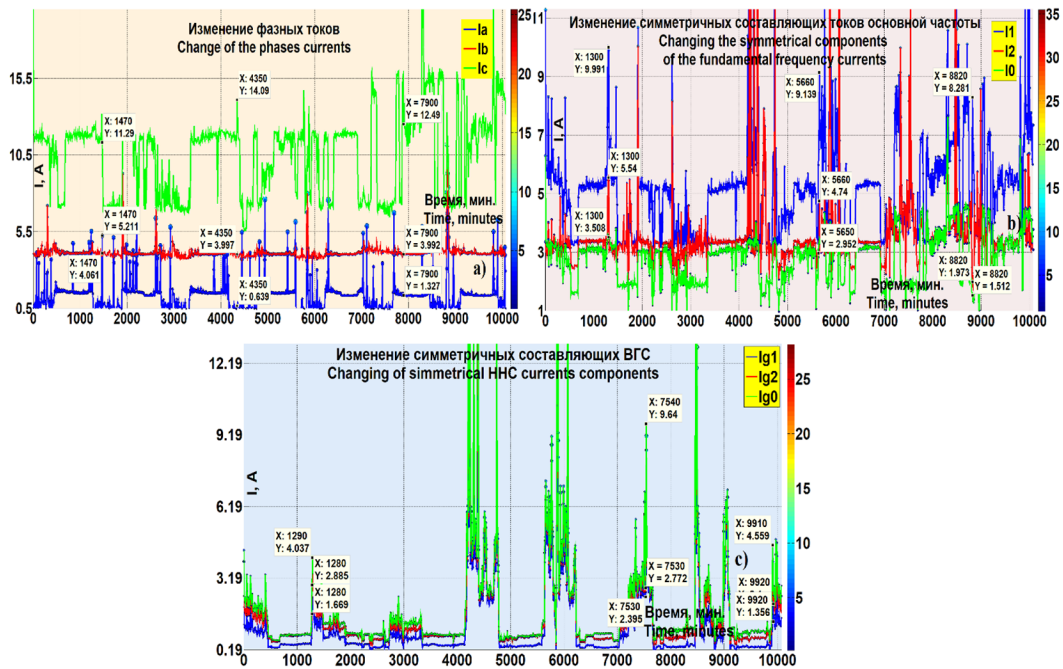


Рис. 7. Временные диаграммы изменения токов в исследуемой электрической сети: а) фазных токов; б) токов прямой, обратной и нулевой последовательностей основной частоты; с) токов прямой, обратной и нулевой последовательностей ННС

Fig. 7. Time diagrams of current changes in the electrical network under study: a) phase currents; b) currents of positive, negative and zero sequences of the fundamental frequency; c) currents of HNC positive, negative and zero sequences

Анализ рис. 8 показал, что за период наблюдения усредненные величины ПН имеют следующие значения: коэффициент потерь $K_P = 7,42$, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U} = 14,34$ %; коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности $K_{0U} = 3,04$ % и установившееся отклонение напряжения $\delta U = 7,76$ %. Как видно, значение указанных ПН в значительной степени превышает нормы, устанавливаемые государственным стандартом [1]³.

Рассмотрим, какой эффект предположительно может оказать подключение предлагаемой модели УБУ в узле сосредоточения нагрузки потребителей (имитационная модель предполагает подключение устройства на шинах вводно-распределительного ВРУ, находящегося на расстоянии 96 м от шин 0,4 кВ ТП.

Анализ рис. 9 показал, что включение модели УБУ в исследуемой электрической сети позволит существенно уменьшить значение ПН: коэффициент потерь мощности K_P снижается на 72,4 % (с 7,42 до 2,05); коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) – на 93 % (с 14,34 % до 1,002); коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{0U}) – на 90 % (с 3,05 % до 0,303 %) и установившееся отклонение напряжения (δU) – на 90,5 % (с 7,76 % до 0,74 %).

³ В соответствии с [1] K_{2U} и K_{0U} в 95 % времени интервала измерения в одну неделю не должны выходить за пределы 2 %; δU в точке передачи ЭЭ не должен превышать ± 10 %, а в точке присоединения потребителя к сети общего назначения – не более ± 5 %.

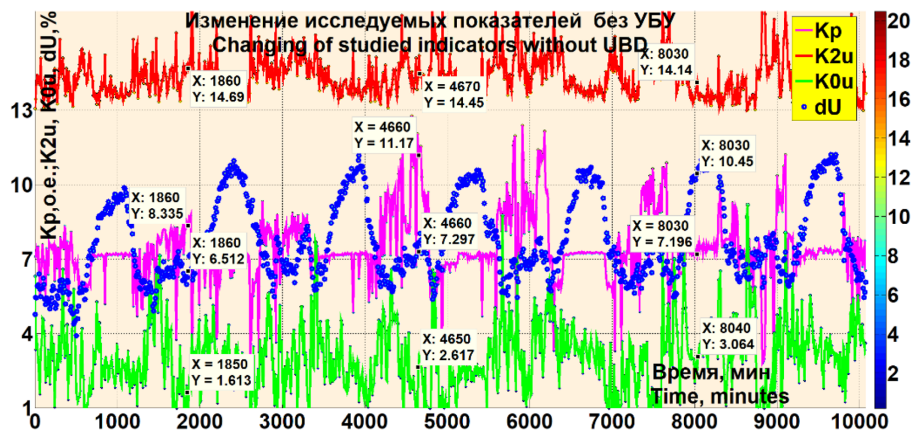


Рис. 8. Диаграммы изменения показателей несбалансированного электропотребления в электрической сети исследуемого объекта при отсутствии УБУ

Fig. 8. Diagrams of changes in the of unbalanced power consumption indicators in the electrical network of the object under study in the UBD absence

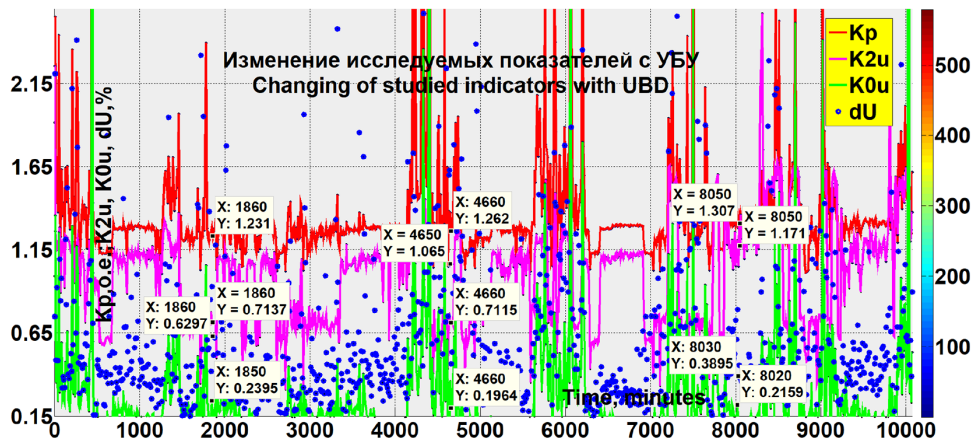


Рис. 9. Диаграммы изменения показателей несбалансированного электропотребления в электрической сети исследуемого объекта при подключении УБУ

Fig. 9. Diagrams of changes in the indicators of unbalanced power consumption in the electrical network of the object under study when UBD is connecting

Как видно из произведенного анализа, балансирующий эффект устройства весьма значителен. Наиболее отчетливо это проявляется при анализе потерь мощности в исследуемой системе электроснабжения (рис. 10).

В результате произведенного анализа этих потерь установлено, что подключение имитационной модели устройства в расчетной точке исследуемой системы электроснабжения позволяет произвести снижение усредненного значения потерь полной мощности в расчетном десятиминутном интервале на 70 % (с 19,5 кВА до 5,39 кВА). На основании анализа протокола измерений установлено, что усредненное значение коэффициента активной мощности составило 0,998. Таким образом, сэкономленное количество электрической энергии с учетом использования предлагаемой модели универсального балансирующего устройства, при условии, что

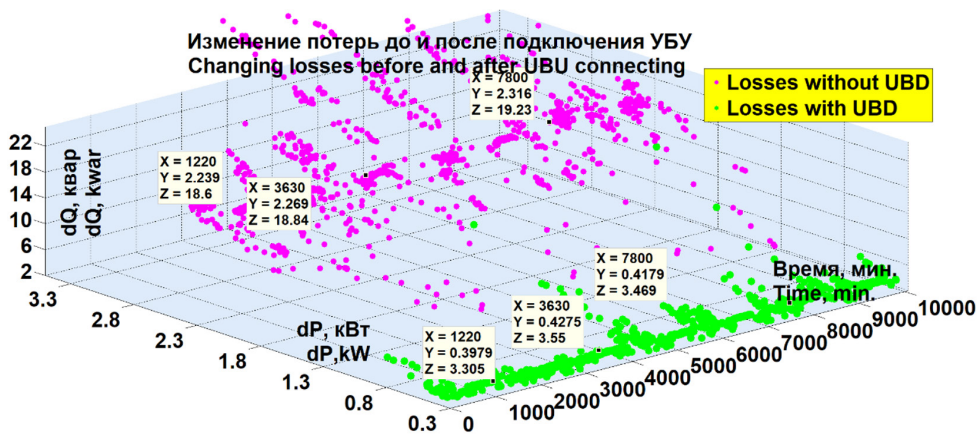


Рис. 10. Временные диаграммы изменения потерь мощности в исследуемой системе электроснабжения до и после подключения УБУ

Fig. 10. Time diagrams of changes in power losses in the studied power supply system before and after UBD connecting

исследуемый объект будет осуществлять электропотребление в течение года непрерывно, могло бы составить 740 138,4 кВт·ч.

В предлагаемой модели устройства батарея конденсаторов (рис. 1, 3) должна быть отключена, поскольку произведенные расчеты показали, что при установленном режиме электропотребления потребности в компенсации потоков реактивной мощности нет.

Заключение

В результате произведенных экспериментальных исследований с учетом результатов имитационного моделирования интеграции разработанного универсального балансирующего устройства в систему электроснабжения реального действующего объекта установлено следующее.

1. В исследуемой системе электроснабжения уровень несбалансированного электропотребления, обусловленный совокупным действием симметричных составляющих токов и напряжений обратной и нулевой последовательности основной частоты, а также дополнительных прямой, обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений, вызываемых эмиссией высших гармонических составляющих, весьма значителен. Это приводит к нарушению норм качества, а также возникновению дополнительных потерь электрической энергии.

2. Для повышения качества электрической энергии и снижения энергетических потерь, обусловленных действием дополнительных совокупностей прямой, обратной и нулевой последовательностей токов, предлагается универсальное техническое средство, балансирующий эффект которого превышает 70 %.

3. Произведенное имитационное моделирование эффективности использования предлагаемого универсального балансирующего устройства показало, что годовое снижение потерь электрической энергии при неизменном электропотреблении в исследуемой электрической сети превышает 740000 кВт·ч.

Список литературы / References

- [1] ГОСТ 32144–2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения/ Дата введения 2014.07.01. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> [GOST 32144–2013. Interstate standard. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of quality of electric energy in general-purpose power supply systems/ Date of introduction 2014.07.01. [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (In Rus.)].
- [2] Standards Coordinating Committee 21 of Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE); IEEE Standard P1547™ (full revision). Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Power Systems Interfaces – Working Group Resource Document. [Electronic resource]. – Access mode: http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547_revision/private/1547revision_drafts.html; Apr., 16 2023.
- [3] Standards Coordinating Committee 21 of Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE); IEEE Standard P1547.8™/D 8. Recommended Practice for Establishing Methods and Procedures that Provide Supplemental Support for Implementation Strategies for Expanded Use of IEEE Standard 1547; IEEE ballot document. [Electronic resource]. – Access mode: <http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547.8/>; March 10, 2023.
- [4] IEEE 1159–2019 – IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. [Electronic resource]. – Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8796486>. Дата обращения: March 23, 2023.
- [5] IEC TS 62749:2020(MAIN) Assessment of power quality – Characteristics of electricity supplied by public networks. [Electronic resource]. – Access mode: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/7568f287-0709-4b64-8f64-b19c62f6b2fd/iec-ts-62749-2020/>; March 27, 2023.
- [6] ASER. Security of EU electricity supply in 2021: Report on Member States approaches to assess and ensure adequacy. Oct.2022. [Electronic resource]. – Access mode: https://acer.europa.eu/Publications/ACER_Security_of_EU_Electricity_Supply_2021.pdf; Apr. 26, 2023.
- [7] Амеликина Н. А., Бодрухина С. С., Цырук С. А. Определение фактического вклада асимметричных потребителей в искажение качества электроэнергии в точке общего подключения // *Электрик*.– 2005.– № 4. С. 17–21. [Amelkina N. A., Bodrukhina S. S., Tsyruk S. A. Determination of the actual contribution of asymmetric consumers to the distortion of electricity quality at the point of common connection // *Electrician*.– 2005. – No. 4. pp. 17–21. (In Rus.)]
- [8] Ануфриев А. И., Платонов И. Ю., Агеев В. А и др. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. *Межвузовский сборник научных трудов*, Саранск.– 2016. – С. 186–190. [Anufriev A. I., Platonov I. Yu., Ageev V. A and others. Energy-efficient and resource-saving technologies and systems. Intercollegiate collection of scientific papers, Saransk.– 2016. – pp. 186–190. (In Rus.)].
- [9] Francisco G. Montoya et all. Power Quality: Scientific Collaboration Networks and Research Trends. *Energies*, 2018, Volume: 11, Number: 2067. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/8/2066>. Apr. 26, 2023.
- [10] David Lumbreras, Eduardo Gálvez, Alfonso Collado and Jordi Zaragoza. Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review. *Energies* 2020, 13(21), 5792; <https://doi.org/10.3390/en13215792>.

[11] Абдиева З.Е., Назаров Б.Б. Причины асимметричных режимов в электрических сетях 0,38 кВ /*Наука и инновационные технологии*. – № 1(3). – С. 64–67. [Abdieva Z.E., Nazarov B.B. Causes of asymmetric modes in 0.38 kV electrical networks. *Science and Innovative technologies*. – No. 1(3). – pp. 64–67. (In Rus)].

[12] Килин С.В., Вендин С.В. Анализ несинусоидальности и асимметрии в электрических сетях 0,4–10 кВ – *Проблемы электрификации сельского хозяйства: сборник научных трудов по материалам Всероссийского НПК*, Ярославль, 2018, с. 15–21. [Kilin S. V., Vendin S. V. Analysis of non-sinusoidality and asymmetry in 0.4–10 kV electrical networks – *Problems of electrification of agriculture: collection of scientific papers based on the materials of the All-Russian NPC*, Yaroslavl, 2018, pp. 15–21. (In Rus.)].

[13] Оськин С.В., др. Результаты анализа качества и безопасности электроэнергии на производственном объекте. – *Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность*, 2017, № 4 (32), с. 149–155. [Oskin S. V., et al. The results of the analysis of the quality and safety of electricity at the production facility. – *Emergency situations: Industrial and Environmental safety*, 2017, No. 4 (32), pp. 149–155. (In Rus.)]

[14] Коновалов Ю.В., Воробьев И.И. Анализ качества электроэнергии на предприятии. – *Вестник Ангарской государственной технической академии*, 2014, № 8, с. 57–60. [Konovalov Yu.V., Vorobyev I.I. Analysis of the quality of electricity at the enterprise. – *Bulletin of the Angarsk State Technical Academy*, 2014, No. 8, pp. 57–60. (In Rus.)].

[15] Козловская В.Б., Калечиц В.Н. Несбалансированные режимы линий наружного освещения. Энергия. – *Труды высших учебных заведений СНГ и энергетических ассоциаций*, 2019, № 62 (3), с. 232–246. [Kozlovskaya V.B., Kalechits V.N. Unbalanced modes of outdoor lighting lines. *Energy*. – *Proceedings of Higher Educational Institutions of the CIS and Energy Associations*, 2019, No. 62 (3), pp. 232–246. (In Rus.)].

[16] Костюков Д.А. Оценка вклада потребителя в асимметрию напряжения вдоль нулевой последовательности в точке общего подключения. – *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*, 2018, № 6 (69), с. 24–34. [Kozlovskaya V.B., Kalechits V.N. Unbalanced modes of outdoor lighting lines. *Energy*. – *Proceedings of Higher Educational Institutions of the CIS and Energy Associations*, 2019, No. 62 (3), pp. 232–246. (In Rus.)]

[17] Килин С.В., Вендин С.В. Анализ несинусоидальности и асимметрии в электрических сетях 0,4–10 кВ. – *Проблемы электрификации сельского хозяйства: сборник научных трудов по материалам Всероссийского НПК*, Ярославль, 2018, с. 15–21. [Kilin S. V., Vendin S. V. Analysis of non-sinusoidality and asymmetry in 0.4–10 kV electrical networks. – *Problems of electrification of agriculture: collection of scientific papers based on the materials of the All-Russian NPC*, Yaroslavl, 2018, pp. 15–21. (In Rus.)].

[18] Сариев И.Н. и др. Влияние асимметрии напряжения на потери электроэнергии в системах электроснабжения. – *Автоматизация и разработка программного обеспечения*, 2017, № 2 (20), с. 46–51. [Sariev I.N. et al. The effect of voltage asymmetry on electricity losses in power supply systems. – *Automation and Software Development*, 2017, No. 2 (20), pp. 46–51. (In Rus.)].

[19] Dugan R., McGranaghan M., Santoso A. and Beaty H. *Electrical Power Systems Quality, 3rd edition, McGraw-Hill, New-York, 2012.*

[20] Ahmed I. A., Zobaa A. F. and Taylor G. A. Power Quality Issues of 3MW Direct-Driven PMSG Wind Turbine. *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Sept. 2015.

[21] Гольдштейн В.Г., Сливкин В.Г. Анализ электромагнитной совместимости низковольтных электроприемников с асимметричными режимами работы высоковольтных электрических сетей. – *Вестник Сам. гос. тех. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки.*– 2002.– № 16, С. 205–208. [Goldstein V.G., Slivkin V.G. Analysis of electromagnetic compatibility of low-voltage electrical receivers with asymmetric modes of operation of high-voltage electrical networks. – *Bulletin of Sam. gos. tech. un-ta. Ser. Phys.-mat. Science.*– 2002. – No. 16, pp. 205–208. (In Rus.)].

[22] Жилин М.И., Воркунов О.В. *Повышение качества электрической энергии / Приоритетные направления развития науки. Сб. статей по материалам международной научно-практической конференции. В 2 частях.* – М.: ООО «Научное партнерство «Апекс».– 2017. – С. 83–85. [Goldstein V.G., Slivkin V.G. Analysis of electromagnetic compatibility of low-voltage electrical receivers with asymmetric modes of operation of high-voltage electrical networks. – *Bulletin of Sam. gos. tech. un-ta. Ser. Phys.-mat. Science.*– 2002. – No. 16, pp. 205–208. (In Rus.)].

[22] Наумов И.В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств. – *Дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук*, Иркутск, 2002, 387 с. [Naumov I. V. Reduction of losses and improvement of the quality of electric energy in rural distribution networks of 0.38 kV with the help of symmetrical devices. – *Diss. for the degree of Doctor of Technical Sciences*, Irkutsk, 2002, 387 p. (In Rus.)].

[23] Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: *Энергоатомиздат*, 2000.– 331 с. [Zhezhelenko, I. V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. – *Moscow: Energoatomizdat*, 2000.– 331 p. (In Rus.)].

[24] Наумов И.В. Метод и программа расчёта потерь мощности и показателей несимметрии токов и напряжений в распределительной сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством. – *Мех. и электр. соц. сельск. хоз-ва.*, 1989, № 3, 30 с. – реф. Деп. Рук. № 22 ВС-89 Деп. [Naumov I. V. Method and program for calculating power losses and indicators of current and voltage asymmetry in a 0.38 kV distribution network with a balancing device. – *Mech. and electric. social. rural. khoz-va.*, 1989, No. 3, 30 p. – ref. Dep. Ruk. No. 22 VS-89 Dep. (In Rus.)].

[25] Наумов И.В., Бастрон А.В. Исследование несимметричных режимов работы внутренних электрических сетей индивидуальных жилых домов в сельской местности. – *НГИЭИ*, 2022, № 6(133), с. 44–58. [Naumov I. V., Bastron A. V. Investigation of asymmetric modes of operation of internal electrical networks of individual residential buildings in rural areas. – *NGIEI*, 2022, No. 6(133), pp. 44–58. (In Rus.)].

[26] Наумов И.В. К вопросу управления несимметричными режимами работы распределительных электрических сетей 0,38 кВ. – *Промышленная энергетика*, 2022, № 5, с. 2–14. [Naumov I. V. On the issue of controlling asymmetric modes of operation of 0.38 kV distribution electric networks. – *Industrial Energy*, 2022, No. 5, pp. 2–14. (In Rus.)].

[27] Коверникова Л.И. Централизованное снижение уровня высших гармоник в сети высокого напряжения с распределенными нелинейными нагрузками с помощью пассивных фильтров. – *Электричество*, 2010. – N 9, С. 50–55. [Kovernikova L. I. Centralized reduction of the level of higher harmonics in a high-voltage network with distributed nonlinear loads using passive filters. – *Electricity*, 2010. – N 9, pp. 50–55. (In Rus.)].

[28] Наумов И. В., Белоусова Е. А. Выбор параметров устройств симметрирования в распределительных электрических сетях 0,38 кВ. – *Вестник КрасГАУ*, 2017, № 1, с. 99–107. [Naumov I. V., Belousova E. A. Selection of parameters of symmetry devices in 0.38 kV distribution electric networks. – *Bulletin of KrasGAU*, 2017, No. 1, pp. 99–107. (In Rus.)].

[29] Наумов И. В., Федоринова Э. С., Якупова М. А., Подъячих С. В. “Unbalance – 1”. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610925 от 07.07.2022*. [Naumov I. V., Fedorinova E. S., Yakupova M. A., Podyachikh S. V. “Unbalance – 1”. *Certificate of state registration of the computer program No. 2022610925 dated 07.07.2022*. (In Rus.)].