

EDN: XDDKIJ

УДК 621.311

## Technological Prerequisites for Evaluating Unbalanced Operating Modes in Components of Low-Voltage Power Supply Systems and Ways to Minimize the Consequences of these Modes

Igor V. Naumov\*

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

Received 23.08.2024, received in revised form 30.08.2024, accepted 06.09.2024

**Abstract.** The purpose of the scientific article is to develop a technology for evaluating unbalanced modes in the 0.4 kV power supply system's components and a way to minimize the consequences of these modes. It is established that the imbalance of the operating modes of the studied electrical networks is due to the asymmetry and non-sinusoidal nature of the three-phase power supply voltage system. The additional symmetrical components of the negative and zero sequences arising in this case, due to the fundamental frequency, as well as the components of the positive, negative and zero sequences due to the emission of higher harmonic components, cause a deterioration in the power quality and an increase in electrical energy losses. A universal balancing device has been developed that allows you to automatically change your parameters at any given time, depending on the changing of unbalanced power consumption level. Due to this, there is a significant improvement in the power quality and electricity losses are reduced by more than 50 %. As a methodological basis for the study, the methods developed by the author for evaluating unbalanced modes during integration into the electrical network of the proposed balancing device model were used. Based on the presented calculation algorithms, the developed software for calculating unbalanced modes is proposed. As an approbation of the results obtained, a simulation modeling of the a balancing device connection to the operating system of the workshop power supply of one of the industrial enterprises was performed, which proved the effectiveness of using the obtained research results.

**Keywords:** unbalanced power consumption, balancing device, voltage asymmetry, higher harmonic components, loss coefficient, quality indicators.

Citation: Naumov I. V. Technological prerequisites for evaluating unbalanced operating modes in components of low-voltage power supply systems and ways to minimize the consequences of these modes. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(6), 777–800. EDN: XDDKIJ



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: professorsnaumov@list.ru

# Технологические предпосылки оценки несбалансированных режимов работы в компонентах низковольтных систем электроснабжения и способы минимизаций последствий этих режимов

**И. В. Наумов**

*Иркутский национальный исследовательский  
технический университет*

*Иркутский государственный аграрный университет*

*имени А. А. Ежевского*

*Российская Федерация, Иркутск*

---

**Аннотация.** Целью научной статьи является разработка технологии оценки несбалансированных режимов в компонентах систем электроснабжения напряжением 0,4 кВ и способа минимизаций последствий этих режимов. Установлено, что несбалансированность режимов работы исследуемых электрических сетей обусловлена несимметрией и несинусоидальностью трёхфазной системы напряжения электропитания. Возникающие при этом дополнительные симметричные составляющие обратной и нулевой последовательности, обусловленные основной частотой, а также составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, обусловленных эмиссией высших гармонических составляющих, вызывают ухудшение качества электрической энергии и возрастание потерь электрической энергии. Разработано универсальное балансирующее устройство, позволяющее в автоматическом режиме в каждый момент времени изменять свои параметры, в зависимости от изменяющегося уровня несбалансированного электропотребления. За счет этого происходит значительное улучшение показателей качества электрической энергии и более чем на 50 % снижаются потери электроэнергии. В качестве методологической базы исследования использовались разработанные автором методы оценки несбалансированных режимов при интеграции в электрическую сеть предлагаемой модели балансирующего устройства. На основе представленных алгоритмов расчета предложено разработанное программное обеспечение расчетов несбалансированных режимов. В качестве апробации полученных результатов произведено имитационное моделирование подключения балансирующего устройства в действующую систему цехового электроснабжения одного из промышленных предприятий, которое доказало эффективность использования полученных результатов исследования.

**Ключевые слова:** несбалансированное электропотребление, балансирующее устройство, несимметрия напряжений, высшие гармонические составляющие, коэффициент потерь, показатели качества.

---

Цитирование: Наумов И. В. Технологические предпосылки оценки несбалансированных режимов работы в компонентах низковольтных систем электроснабжения и способы минимизаций последствий этих режимов / И. В. Наумов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(6). С. 777–800. EDN: XDDKIJ

---

## Введение

Наиболее проблемными с точки зрения низкой функциональности использования электрической энергии (ЭЭ) являются именно низковольтные электрические сети (ЭС) напряжением 0,4 кВ. При этом речь следует вести не только о распределительных ЭС, питающих сельские населенные пункты, но также и аналогичные ЭС, питающие потребителей городского хозяйства. Кроме того, на этом же номинальном напряжении получают питание производственные

потребители промышленности (цеховые электрические сети) и агропромышленного комплекса. Следует иметь в виду, что в большинстве технологических процессов производства товарной продукции и обеспечения жизнедеятельности именно на напряжении 0,4 кВ осуществляется преобразование энергии электрической в ее другие виды, обеспечивая при этом цели и задачи электропотребления. И еще очень важной характеристикой этих ЭС является их многоамперность, в силу которой любые функциональные отступления от нормальных условий работы влекут за собой существенные последствия.

Под снижением функциональности рассматриваемых ЭС следует понимать процессы, происходящие в этих сетях в результате измененных режимов работы, вызванных в первую очередь несбалансированностью электропотребления. Безусловно, есть и другие отличительные особенности этих сетей, такие как низкая оснащенность средствами управления, по сравнению с ЭС средних и высокого напряжений, а также существенный износ элементов этих сетей и основного сетевого электрооборудования.

В данном исследовании подробно будут рассматриваться именно несбалансированные режимы работы ЭС 0,4 кВ. Так что же такое несбалансированность режима работы сети и чем она вызывается?

Под понятием несбалансированности (unbalancing) следует понимать режим работы электрической сети, при котором электропотребление, в силу измененных режимов работы различных электроприемников, является источником генерации дополнительных симметричных составляющих (ДСС) токов и напряжений. Эти составляющие обусловлены несимметричными и несинусоидальными режимами работы.

*Несимметричные* режимы характеризуются тремя видами несимметрии токов: *статистической*, обусловленной неравномерностью распределения однофазных электроприемников (ЭП) в трёхфазной системе; *вероятностной*, обусловленной случайным характером коммутаций этих электроприемников в течение времени суток, а также *аварийной* несимметрией токов, образующейся в результате аварийных режимов, приводящих к неполнофазным режимам работы (однофазные и двухфазные – при обрыве одной или двух фаз). Исследованиям несимметричных режимов посвящено достаточно много работ [1–11]. В результате возникновения несимметричного тока он, протекая по элементам в ЭС, создает на каждом из них несимметричную систему напряжений. В результате в сети возникают системы симметричных составляющих токов и напряжений, в соответствии с методом симметричных составляющих Ч. Фортескую [12]:

$$\begin{cases} I_A = \underline{I}_1 + I_2 + \underline{I}_0; \\ I_B = \underline{a}^2 I_1 + \underline{a} I_2 + \underline{I}_0; \\ I_C = \underline{a} I_1 + \underline{a}^2 I_2 + \underline{I}_0; \end{cases} \quad \begin{cases} U_A = \underline{U}_1 + U_2 + \underline{U}_0; \\ U_B = \underline{a}^2 U_1 + \underline{a} U_2 + \underline{U}_0; \\ U_C = \underline{a} U_1 + \underline{a}^2 U_2 + \underline{U}_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\underline{I}_1$  и  $\underline{U}_1$  – комплексные значения тока и напряжения прямой последовательности основной частоты;  $I_2$ ,  $\underline{I}_0$ ,  $U_2$  и  $\underline{U}_0$  – комплексные значения токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей основной частоты напряжения электропитания;  $\underline{a}$  – комплексный оператор поворота, равный  $e^{j120^\circ}$ .

Вместе с тем, как уже было отмечено выше, несбалансированность режима работы исследуемых ЭС, кроме несимметрии токов и напряжений, дополняется последствием *несину-*

*соидальности* токов и напряжений, возникающей в этих сетях вследствие работы электрооборудования и ЭП, имеющих нелинейную вольтамперную характеристику. Практически во всех областях хозяйственной деятельности (промышленность, военно-промышленный и агропромышленный комплексы, добывающая промышленность, транспорт и пр.) используются новейшие полупроводниковые приборы (ПП), которые являются основными элементами силовой электроники, выполняющей роль ключевых элементов при управлении усреднёнными потоками мгновенной мощности, осуществляя при этом пропускание или блокирование потоков электроэнергии в нужном направлении [14]. К таким управляемым ПП можно отнести всевозможные транзисторы, тиристоры, симисторы, полевые транзисторы (MOSFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), частотно-регулируемый привод (VSD) для управления асинхронными двигателями и др. Кроме того, элементная база современных электроприемников, используемых в целях жизнеобеспечения населения, также связана с использованием твёрдотельных ключевых приборов в виде различных интеллектуальных модулей и интегральных схем, выпрямителей, используемых в бытовых электронных приборах (телевизоры, ПК, зарядные устройства [15, 16]. И более того, современное направление в электроэнергетике также связано с созданием интеллектуальных сетей, представляющих собой модернизированную электрическую сеть, использующую информационно-коммуникационные технологии для осуществления автоматизированного сбора информации, ее обработки и принятия оперативных решений с целью повышения эффективности, надёжности, экономичности и устойчивости процессов производства, преобразования, распределения, транспорта и потребления электрической энергии [16]. При этом, вне всякого сомнения, эволюция силового оборудования определяется уровнем его востребованности в указанных процессах и, безусловно, конструирование новых современных устройств будет совершенствоваться и продолжаться.

Но при этом функционирование ПП характеризуется появлением (эмиссией) дополнительных симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей различных совокупностей высших гармонических составляющих (ВГС) токов, которые создают аналогичные эмиссионные потоки напряжений. К примеру, дополнительная прямая последовательность (APS – additional positive sequence) обусловлена эмиссией совокупностей токов:  $I_4, I_7, I_{11}, I_{14}, \dots$ , дополнительная обратная (ANS – additional negative sequence) –  $I_2, I_5, I_8, I_{11}, \dots$  и дополнительная нулевая (AZS – additional zero sequence) –  $I_3, I_6, I_9, I_{12}, \dots$ <sup>1</sup>. При этом стандарты [17–21] рекомендуют учитывать до 40-й гармоники включительно.

Проведенными исследованиями установлено, что множество используемых преобразователей (П), состоящих из средств твердотельной электроники (СТЭ), характеризуются так называемой пульсностью – то есть отношением частоты пульсаций к частоте питающего переменного напряжения, связанной с количеством СТЭ в трёхфазной системе. Например, для двухпульсного (однофазного П) характерна следующая совокупность высших гармонических составляющих ВГС: 3,5,7,9,11,13..., для трёхпульсного трёхфазного – 2,4,5,7,8,10..., шестипульсного – 5,7,11,17,19..., двенадцатипульсного – 11,13,23,25... [22–26].

Следовательно, объективно режимы работы действующих электрических сетей 0,4 кВ необходимо рассматривать в совокупности несимметричного и несинусоидального режимов, которые образуют так называемый несбалансированный режим работы (НРР) этих сетей.

<sup>1</sup> Нижний индекс соответствует порядку гармонической составляющей

Таким образом, **целью** статьи является исследование несбалансированных режимов работы действующих ЭС, и для достижения указанной цели формируется ряд **задач**, а именно: *разработка научно-методологических основ расчетов НРР; разработка технических средств минимизаций последствий НРР; разработка программного комплекса как инструментария расчетов НРР; апробация полученных результатов посредством имитационного моделирования интеграции разработанных технических средств в действующей ЭС 0,4 кВ.*

### Методы, модели, инструменты

**Методы.** Поскольку реальные режимы работы действующих ЭС напряжением 0,4 кВ, как уже было сказано, объективно характеризуются и несимметричным, и несинусоидальным характером электропотребления, образующим общий несбалансированный режим электропотребления, соответственно, фазные токи и напряжения, определяемые по выражениям (1), преобразуются в следующие:

$$\begin{cases} I_A = \Sigma\{(I_1 + \Sigma_4^{40} I_{APS}), (I_2 + \Sigma_2^{38} I_{ANS}), (I_0 + \Sigma_3^{39} I_{AZS})\}; \\ I_B = \underline{a}^2(I_1 + \Sigma_4^{40} I_{APS}) + \underline{a}(I_2 + \Sigma_2^{38} I_{ANS}) + (I_0 + \Sigma_3^{39} I_{AZS}); \\ I_C = \underline{a}(I_1 + \Sigma_4^{40} I_{APS}) + \underline{a}^2(I_2 + \Sigma_2^{38} I_{ANS}) + (I_0 + \Sigma_3^{39} I_{AZS}); \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} U_A = \Sigma\{(U_1 + \Sigma_4^{40} U_{APS}), (U_2 + \Sigma_2^{38} U_{ANS}), (U_0 + \Sigma_3^{39} U_{AZS})\}; \\ U_B = \underline{a}^2(U_1 + \Sigma_4^{40} U_{APS}) + \underline{a}(U_2 + \Sigma_2^{38} U_{ANS}) + (U_0 + \Sigma_3^{39} U_{AZS}); \\ U_C = \underline{a}(U_1 + \Sigma_4^{40} U_{APS}) + \underline{a}^2(U_2 + \Sigma_2^{38} U_{ANS}) + (U_0 + \Sigma_3^{39} U_{AZS}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Sigma_4^{40} I_{APS}$ ,  $\Sigma_2^{38} I_{ANS}$ ,  $\Sigma_3^{39} I_{AZS}$ ,  $\Sigma_4^{40} U_{APS}$ ,  $\Sigma_2^{38} U_{ANS}$  и  $\Sigma_3^{39} U_{AZS}$  – суммарные значения комплексных значений симметричных составляющих, обусловленных совокупностями ВГС токов и напряжений, соответственно, дополнительных прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Исследованиям несинусоидальных режимов посвящено также достаточное количество публикаций [27–31]. Кроме того, имеется ряд публикаций, посвященных исследованиям именно объединенных несбалансированных режимов [32–35].

Все эти работы посвящены исследованиям показателей качества электрической энергии, которые изменяются при несимметрично-несинусоидальных воздействиях. При этом не только ухудшается качество, но и возрастают дополнительные потери мощности и ЭЭ.

В соответствии с [17] в качестве критериев оценки качества ЭЭ только при несимметричном режиме работы трёхфазной ЭС рассматриваются следующие показатели:

$$\begin{aligned} K_{2U_{\text{нес.}}} &= \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 \%; & K_{0U_{\text{нес.}}} &= \frac{U_0}{U_1} \cdot 100 \%; \\ \delta U_{(-)} &= \left[ \frac{(U_{\text{н}} - U_{m(-)})}{U_0} \right] \cdot 100; & \delta U_{(+)} &= \left[ \frac{(U_{m(+)} - U_{\text{н}})}{U_{\text{н}}} \right] \cdot 100, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $K_{2U_{\text{нес.}}}$  и  $K_{0U_{\text{нес.}}}$  – коэффициенты несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям основной частоты напряжения электропитания соответственно;  $\delta U_{(-)}$ ,  $\delta U_{(+)}$  – соответственно отрицательное и положительное отклонения напряжения;  $U_{m(-)}$ ,  $U_{m(+)}$  – значения напряжения электропитания, меньшие  $U_{\text{н}}$  и большие  $U_{\text{н}}$  соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями [17];  $U_{\text{н}}$  – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению  $U_{\text{ном}}$  или согласованному напряжению  $U_{\text{с}}$ .

В условиях несимметрично-несинусоидального (несбалансированного режима работы – НРР) ЭС показатели  $K_{2и}$  и  $K_{0и}$  будут определяться уже с учетом дополнительных совокупностей ВГС напряжений:

$$K_{2УНРР} = \frac{(U_2 + \sum_2^{38} U_{ANS})}{U_1} \cdot 100 \%; \quad K_{0УНРР} = \frac{(U_0 + \sum_3^{39} U_{AZS})}{U_1} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

Кроме того, для оценки уровня гармонического состава напряжения электропитания в НРР вводится коэффициент несинусоидальности:

$$K_{(Un)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \%,$$

где  $U_{(n)}$  – напряжение гармонической составляющей до 40-го порядка (в соответствии с [17]).

Вместе с тем, как было сказано выше, симметричные составляющие токов основной частоты и дополнительные симметричные составляющие токов ВГС создают соответствующие потери активной мощности и ЭЭ. При этом определяющим критерием оценки этих потерь в линии электропередачи, отходящей от шин 0,4 кВ трансформаторной подстанции (ТП) и питающей трёхфазную несимметричную нагрузку потребителей только при несимметричном режиме, является коэффициент увеличения потерь мощности, представляющий собой отношение потерь активной мощности в несимметричном режиме к соответствующим потерям мощности, обусловленным протеканием только токов прямой последовательности основной частоты напряжения электропитания [36]):

$$K_{РЛ.(нес.)} = 1 + K_{2и}^2 + K_{0и}^2 \cdot K_{РЛ.} \quad (6)$$

Во вторичной обмотке силового трансформатора (СТ) ТП также создаются дополнительные потери, которые можно оценить коэффициентом дополнительных потерь:

$$K_{РСТ.(нес.)} = 1 + K_{2и}^2 + K_{0и}^2 \cdot K_{РСТ.} \quad (7)$$

где  $K_{РЛ.} = r_{0Л.}/r_{1Л.}$  – коэффициент активного сопротивления ЛЭП;  $r_l = r_\phi$  – активное сопротивление прямой последовательности, равное фазному сопротивлению линии электропередачи;  $r_0 = r_\phi + 3r_N$  – активное сопротивление нулевой последовательности ЛЭП;  $r_N$  – активное сопротивление нейтрального проводника. Также сопротивления  $r_{0Л.}$  и  $r_{1Л.}$  могут быть определены по справочным данным для конкретного сечения ЛЭП. При одинаковых сечениях фазного и нулевого проводников их активные сопротивления будут равны. Соответственно, и коэффициент  $K_R$  в этом случае будет равен 4;  $K_{РСТ.} = r_{0СТ.}/r_{1СТ.}$  – коэффициент активного сопротивления СТ;  $r_{0СТ.}$  и  $r_{1СТ.}$  активные сопротивления, соответственно нулевой и прямой последовательностей СТ, определяемые на основании данных справочной литературы для любого СТ.

$K_{2и} = \frac{I_2}{I_1}$ ,  $K_{0и} = \frac{I_0}{I_1}$  – коэффициенты, обусловленные протеканием токов обратной и нулевой

последовательностей основной частоты, определяемые в соответствии с [36].

С учетом того, что мы рассматриваем объединенный НРР ЭС, выражение (6) для линии будет выглядеть следующим образом:

$$K_{РЛ.(НРР)} = 1 + \left( \sum_4^{40} K_{APS} \right)^2 + K_{2i}^2 + \left( \sum_2^{38} K_{ANS} \right)^2 + \left\{ K_{0i}^2 + \left( \sum_3^{39} K_{AZS} \right)^2 \right\} \cdot K_{RL}. \quad (8)$$

Для силового трансформатора:

$$K_{РСТ.(НРР)} = 1 + \left( \sum_4^{40} K_{APS} \right)^2 + K_{2i}^2 + \left( \sum_2^{38} K_{ANS} \right)^2 + \left\{ K_{0i}^2 + \left( \sum_3^{39} K_{AZS} \right)^2 \right\} \cdot K_{RCT}. \quad (9)$$

где коэффициенты  $\sum_4^{40} K_{APS} = \frac{\sum_4^{40} I_{APS}}{I_1}$ ,  $\sum_2^{38} K_{ANS} = \frac{\sum_2^{38} I_{ANS}}{I_1}$  и  $\sum_3^{39} K_{AZS} = \frac{\sum_3^{39} I_{AZS}}{I_1}$  – суммарные коэффициенты, представляющие собой отношение сумм гармонических составляющих, формирующих дополнительные прямую, обратную и нулевую последовательности, к гармонической составляющей тока прямой последовательности основной частоты.

Выражения для определения значений симметричных составляющих токов и напряжений при несимметричном режиме с достаточной степенью достоверности могут быть определены в соответствии с модульным методом расчета, предложенным профессором Ф. Д. Косоуховым [13]:

$$\begin{aligned} I_1 &= \left( \frac{1}{6 \cdot I_A} \right) \cdot \{ [3 \cdot I_A^2 - I_A \cdot (d + \sqrt{3} \cdot g) + 2 \cdot \sqrt{3} \cdot g] + j \cdot [\sqrt{3} \cdot I_A^2 - I_A \cdot (\sqrt{3} \cdot d - e) - 2 \cdot \sqrt{3} \cdot h] \}; \\ I_2 &= \left( \frac{1}{6 \cdot I_A} \right) \{ [3 \cdot I_A^2 - I_A \cdot (\sqrt{3} \cdot e - d) - 2 \cdot \sqrt{3} \cdot g] - j \cdot [\sqrt{3} \cdot I_A^2 - I_A \cdot (\sqrt{3} \cdot d + e) - 2 \cdot \sqrt{3} \cdot h] \}; \\ U_1 &= \frac{1}{6} [2U_A + \sqrt{3} \cdot (s + r) - (p + g)] + j[(s - r) + \sqrt{3} \cdot (p - g)]; \\ U_2 &= \frac{1}{6} [2U_A - \sqrt{3} \cdot (s + r) - (p + g)] + j[(s - r) - \sqrt{3} \cdot (p - g)]; \quad I_0 = \frac{1}{3} \cdot (d - j \cdot e); \\ U_0 &= \frac{1}{3} [U_A + (p + g) - j(s - r)]. \end{aligned} \quad (10)$$

В выражениях (10):

$$c_1 = \sqrt{I_A^2 - b_1^2}, \quad c_2 = \sqrt{I_B^2 - b_1^2}, \quad e = \sqrt{I_N^2 - c}, \quad g = b_1 \cdot c_1 + b_2 \cdot c_1, \quad h = b_1 \cdot b_2 - c_1 \cdot c.$$

$$; s = \sqrt{U_R^2 - p}, \quad r = \sqrt{U_C^2 - g^2}, \quad s = \sqrt{U_B^2 - p^2}; \quad p = \frac{U_A}{2} + \frac{U_B^2}{2U_A} - \frac{U_{AE}^2}{2U_A}; \quad g = \frac{U_A}{2} + \frac{U_C^2}{2U_A} - \frac{U_i^2}{2U_A}$$

Значения фазных токов, фазных и междуфазных напряжений в реальной действующей электрической сети можно определить, используя сертифицированные измерительные комплексы, такие как Ресурс – UF2M, либо анализатор качества электрической энергии PQ-701 (рис. 1). Эти же приборные комплексы позволяют произвести измерение ВГС токов и напряжений для определения показателей, вычисляемых по выражениям (2) – (3) и (8) – (9).

Таким образом, используя описанную методологию, можно оценивать реальные несбалансированные режимы работы в действующих электрических сетях 0,4 кВ. Задачей подобных исследований является не только констатация измененных параметров ЭЭ в таких режимах, которые, безусловно, ухудшают качество ЭЭ в едином электромагнитном пространстве электрической сети и увеличивают ее потери. Вследствие этого возникает необходимость разработки специализированных балансирующих устройств (БУ), которые могли бы минимизировать последствия НРР, повышая эффективность использования ЭЭ. При этом необходимы и методы, и программные средства, обеспечивающие расчеты параметров и самих БУ, а также

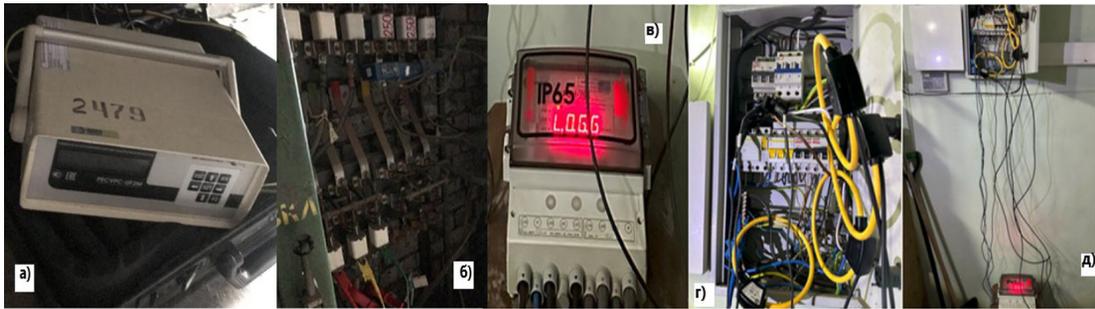


Рис. 1. Приборы для измерения параметров и показателей качества электрической энергии: Ресурс-UF2M (а) и его подключение к сети (б); прибор PQ-701 (в) и его подключение к сети (г) и (д)

Fig. 1. Devices for measuring parameters and power quality indicators: Resource-UF2M (a) and its connection to the network (b); device PQ-701 (c) and its connection to the network (d) and (e)

параметров и показателей НРР с учетом интеграции этих БУ непосредственно в исследуемую электрическую сеть.

Кафедрами электроснабжения и электротехники Иркутского ГАУ и Иркутского НИТУ в течение многих лет проводится значительная исследовательская работа в этой области. По результатам исследований, на основе обширных патентных поисков в разные временные периоды получены патенты на изобретения для различных симметрирующих устройств, минимизирующих последствия только несимметричных режимов (без учета эмиссии ВГС) [37–41]. Отличительной особенностью всех этих технических средств является тот факт, что симметрирующие устройства либо имеют регулируемую мощность, которая ступенчато увеличивается или уменьшается при изменении мощности трёхфазной несимметричной нагрузки [37–39], либо параметры этих устройств автоматически плавно изменяются в соответствии с изменяющимся уровнем несимметричного электропотребления [40, 41]:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{1\text{СУ неск.}}(\underline{U}_1, \underline{I}_1, t_0, \bar{t}_i) &= \underline{Y}_{2\text{СУ неск.}}(\underline{U}_1, \underline{I}_1, t_0, \bar{t}_i) = \frac{1}{14,1428 \cdot (\bar{t}_i - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{\bar{t}_i} \frac{\underline{I}_1(t)}{\underline{U}_1(t)} dt; \\ \underline{Y}_{0\text{СУ неск.}}(\underline{U}_0, \underline{I}_0, t_0, \bar{t}_i) &= \frac{6}{(\bar{t}_i - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{\bar{t}_i} \frac{\underline{I}_0(t)}{\underline{U}_0(t)} dt, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\underline{Y}_{1\text{СУ неск.}}$ ,  $\underline{Y}_{2\text{СУ неск.}}$  и  $\underline{Y}_{0\text{СУ неск.}}$  – соответственно комплексные значения проводимостей прямой (обратной) и нулевой последовательностей симметрирующего устройства;  $t_0$ ,  $\bar{t}_i$  – соответственно начальный и конечный интервалы времени фиксации параметров ЭЭ при измерениях в действующих электрических сетях.

Для объединенных несбалансированных режимов выражение (11) будет преобразовано за счет добавки суммарных значений дополнительных симметричных составляющих ВГС токов и напряжений:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{1\text{БУННР}} \left( \left\{ \underline{U}_1 + \sum_4^{40} \underline{U}_{APS} \right\}, \left\{ \underline{I}_1 + \sum_4^{40} \underline{I}_{APS} \right\}, t_0, \bar{t}_i \right) &= \frac{1}{14,1428 \cdot (\bar{t}_i - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{\bar{t}_i} \frac{\{\underline{I}_1 + \sum_4^{40} \underline{I}_{APS}\}(t)}{\{\underline{U}_1 + \sum_4^{40} \underline{U}_{APS}\}(t)} dt; \\ \underline{Y}_{2\text{БУННР}} \left( \left\{ \underline{U}_2 + \sum_2^{38} \underline{U}_{ANS} \right\}, \left\{ \underline{I}_2 + \sum_2^{38} \underline{I}_{ANS} \right\}, t_0, \bar{t}_i \right) &= \frac{1}{14,1428 \cdot (\bar{t}_i - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{\bar{t}_i} \frac{\{\underline{I}_2 + \sum_2^{38} \underline{I}_{ANS}\}(t)}{\{\underline{U}_2 + \sum_2^{38} \underline{U}_{ANS}\}(t)} dt; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\underline{Y}_{0\text{БУННР}} \left( \left\{ \underline{U}_0 + \sum_3^{39} \underline{U}_{AZS} \right\}, \left\{ L_0 + \sum_3^{39} L_{AZS} \right\}, t_0, \bar{t}_i \right) = \frac{6}{(\bar{t}_i - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{\bar{t}_i} \frac{\{L_0 + \sum_3^{39} L_{AZS}\}(t)}{\{\underline{U}_0 + \sum_3^{39} \underline{U}_{AZS}\}(t)} dt,$$

где  $\underline{Y}_{1\text{БУННР}}$ ,  $\underline{Y}_{2\text{БУННР}}$  и  $\underline{Y}_{0\text{БУННР}}$  – комплексные значения проводимостей универсального балансирующего устройства (БУ) соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей.

*Модели и средства.* Примером такого балансирующего устройства может служить техническое средство, описанное в [42]. Вместе с тем данное БУ требует перебора и ручного подключения различного количества узкополосных резонансных фильтров (УРФ) в зависимости от состава дополнительных ВГС соответствующих последовательностей. В настоящее время в Патентном бюро РФ находится на рассмотрении заявка на изобретение усовершенствованной версии автоматического БУ, схема которого представлена на рис. 2.

Отличительной особенностью предлагаемой модели БУ является возможность полностью автоматизированной работы устройства, изменяющего свои параметры в функции изменяю-

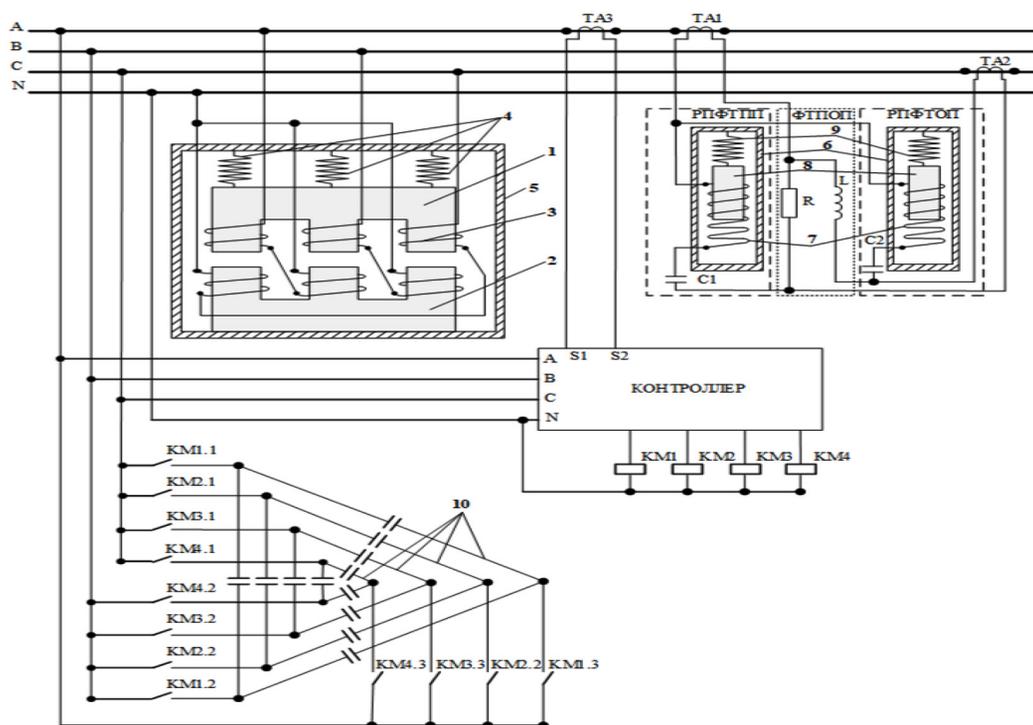


Рис. 2. Конструкция балансирующего устройства и его подключение к низковольтной электрической сети: 1 – подвижный сердечник ЭМУ; 2 – неподвижный сердечник ЭМУ; 3 – обмотка ЭМУ; 4 – пружины ЭМУ; 5 – корпус ЭМУ; 6 – Корпуса РПФТПП и РПФТОП; 7 – обмотки РПФТПП и РПФТОП; 8 – регулируемые сердечники РПФТПП и РПФТОП; 9 – пружины РПФТПП и РПФТОП; 10 – блоки УКРМ; C1, C2 – ёмкости РПФТПП и РПФТОП; L – дроссель; ТА – трансформаторы тока; КМ – контакторы блоков УКРМ; R – резистор; ФТПОП – схемное решение фильтра токов прямой-обратной последовательностей

Fig. 2. The design of the balancing device and its connection to a low-voltage electrical network: 1 – movable EMD core; 2 – fixed EMD core; 3 – EMD winding; 4 – EMD springs; 5 – EMU housing; 6 – RPFPCPS and RPF-TOP enclosures; 7 – RPF-TPP and RPF-TOP windings; 8 – adjustable RPF-CPS cores and RPF-TNS; 9 – RPF-CPS and RPF-TOP springs; 10 – UKRM blocks; C1, C2 – RPF-TPP and RPF-TOP capacitances; L – choke; TA – current transformers; KM – contactors of DCRP blocks; R – resistor; FTPNS – circuit solution of the positive-negative sequence current filter

щихся значений симметричных составляющих (СС) токов и напряжений основной частоты электропитания, а также СС токов и напряжений, обусловленных эмиссией ВГС.

Общий принцип действия предлагаемого БУ по многим позициям аналогичен принципу действия устройства, описанному в [43]. В комплект БУ входят следующие элементы (рис. 2). ЭМУ – электромагнитное устройство, имеющее минимальное сопротивление токам нулевой последовательности, автоматически, за счет подвижных сердечников, в каждый момент времени создает колебательный контур для всех токов нулевой последовательности, обусловленными как основной частотой, так и ВГС, кратным трём. Представленная схема соединения дросселя  $L$  и чисто активного сопротивления  $R$  образует комбинацию фильтров токов прямой (ФТПП) и обратной (ФТОП) последовательностей, к зажимам которых присоединены регулируемые полосные фильтры токов прямой (РПФТПП) и обратной (РПФТОП) последовательностей, создающих колебательные контуры для совокупностей дополнительных симметричных составляющих токов соответственно прямой ( $I_4, I_7, I_{11}, I_{14} \dots$ ) и обратной ( $I_2, I_5, I_8, I_{11} \dots$ ) последовательностей. При этом сама схема соединения дросселя и чисто активного сопротивления и их расчет подробно рассмотрены в [44]. В этой схеме параметры дросселя ( $L$ ), имеющего активное сопротивление  $r$  и индуктивное –  $x$ , определяются как [44]:

$$r = 0,5 \cdot (R - Z_{рф}); x = 0,5 \cdot (R + Z_{рф}) \cdot \sqrt{3}, \quad (13)$$

где  $Z_{рф}$  – полное сопротивление, каждого из регулируемых полостных фильтров прямой и обратной последовательностей, которое, за счёт изменения положения подвижных сердечников в каждый момент времени настраивается в резонанс:  $x_{Lрф} = x_{Срф}$ , соответственно, как для РПФТПП, так и для РПФТОП. В результате в каждом из регулируемых полосных фильтров прямой и обратной последовательностей создаются колебательные контуры для дополнительных совокупностей токов прямой и обратной последовательностей.

Индуктивное сопротивление ( $L$ ) схемы целесообразнее всего выполнять в виде дросселя с воздушным зазором. Чисто активное сопротивление ( $R$ ) изготавливается из константановой или реотановой проволоки диаметром 1,5–2 мм в виде спирали. Более подробно расчет  $L$  и  $R$  представлен в [44].

Таким образом, задача ЭМУ, РПФТПП и РПФТОП заключается в том, чтобы, создавая колебательные контуры для всех дополнительных совокупностей токов, соответственно, нулевой, прямой и обратной последовательностей, осуществлять их вычленение из низковольтной электрической сети, тем самым минимизируя последствия НРР.

Еще одним составляющим элементом описываемого балансирующего устройства (БУ) является комплект батарей конденсаторов (БК), образующих регулируемое устройство компенсации реактивной мощности (РУКРМ – рис. 2, 10). Изменение мощности батарей конденсаторов происходит ступенчато в функции расчётного коэффициента реактивной мощности ( $tg\varphi$ ). Рассматривается 4 ступени мощности БК, соответствующие следующим пределам изменяемого  $tg\varphi$ : 1-я – (0,4–0,6); 2-я – (0,61–0,8); 3-я – (0,81–1,0) и 4-я – более 1,1. Включение данных ступеней мощности регулируется контроллером, передающим сигналы соответствующим обмоткам пускателей (КМ).

В соответствии с изменяемыми пределами коэффициента реактивной мощности мощность БК рассчитывается выражением:

$$Q_{\text{БК}} = P \cdot (\text{tg}\varphi - 0,35), \quad (14)$$

где  $\text{tg}\varphi = \frac{Q}{P}$  – коэффициент реактивной мощности, рассчитываемый и усредняемый в каждом

из 10-минутных временных интервалов расчётных данных, в соответствии со стандартом [17];  $P$  и  $Q$  – соответственно активная и реактивная потребляемые нагрузкой мощности, усредненные в этих же временных интервалах.

При использовании БУ как средства минимизации последствий НРР симметричные составляющие токов и напряжений определяются на основе решения системы уравнений, составленной для схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей электрической сети, к которой может подключаться предлагаемое БУ [15]:

$$\begin{cases} \underline{I}_{\text{н1}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{а}} + Y_{\text{э1}}}{Y_{\text{а}} \cdot Y_{\text{э1}}} \right) + \underline{I}_{\text{н2}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{а}} + Y_{\text{э2}}}{Y_{\text{а}} \cdot Y_{\text{э2}}} \right) + \underline{I}_{\text{н0}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{а}} + Y_{\text{э0}}}{Y_{\text{а}} \cdot Y_{\text{э0}}} \right) = \underline{U}_{\text{э1}} \cdot (\underline{m}_1 + \underline{m}_2 + \underline{m}_3); \\ \underline{a}^2 \underline{I}_{\text{н1}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{б}} + Y_{\text{э1}}}{Y_{\text{б}} \cdot Y_{\text{э1}}} \right) + \underline{a} \underline{I}_{\text{н2}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{б}} + Y_{\text{э2}}}{Y_{\text{б}} \cdot Y_{\text{э2}}} \right) + \underline{I}_{\text{н0}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{б}} + Y_{\text{э0}}}{Y_{\text{б}} \cdot Y_{\text{э0}}} \right) = \underline{U}_{\text{э1}} \cdot (\underline{a}^2 \underline{m}_1 + \underline{a} \underline{m}_2 + \underline{m}_3); \\ \underline{a} \underline{I}_{\text{н1}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{с}} + Y_{\text{э1}}}{Y_{\text{с}} \cdot Y_{\text{э1}}} \right) + \underline{a}^2 \underline{I}_{\text{н2}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{с}} + Y_{\text{э2}}}{Y_{\text{с}} \cdot Y_{\text{э2}}} \right) + \underline{I}_{\text{н0}}^I \cdot \left( \frac{Y_{\text{с}} + Y_{\text{э0}}}{Y_{\text{с}} \cdot Y_{\text{э0}}} \right) = \underline{U}_{\text{э1}} \cdot (\underline{a} \underline{m}_1 + \underline{a}^2 \underline{m}_2 + \underline{m}_3), \end{cases} \quad (15)$$

где  $Y_{\text{э1}} = Y_{\text{сети1}} + (Y_{\text{S1}} + Y_{\text{БУННР}})$  и  $Y_{\text{э0}} = Y_{\text{сети0}} + Y_{\text{БУННР}}$  – соответственно комплексные значения эквивалентных проводимостей, включающие в себя комплексные проводимости прямой обратной и нулевой последовательностей элементов электрической сети (линии высокого и низкого напряжений, силовой трансформатор 10/0,4 кВ);  $Y_{\text{с}}$  – комплексная проводимость прямой

последовательности трёхфазной симметричной нагрузки;  $\underline{U}_{\text{э1}} = \frac{Y_{\text{сети1}} \cdot U_{\text{ном.}}}{n \cdot Y_{\text{э1}}}$  – комплексное

значение эквивалентного напряжения схемы замещения прямой последовательности;  $n$  – коэффициент трансформации СТ 10/0,4 кВ;  $\underline{m}_1$ ,  $\underline{m}_2$  и  $\underline{m}_3$  – комплексные коэффициенты, определяемые в соответствии с [45].

В результате произведенных преобразований получены выражения для определения симметричных составляющих токов в линии и напряжений на зажимах нагрузки (16, 17):

$$\begin{cases} \underline{I}_{\text{л1}} = \underline{I}_{\text{н1}}^I + \underline{I}_{\text{с1}} + \underline{I}_{\text{сy1}} = \frac{\underline{U}_{\text{н1}} \cdot \left[ Y_{\beta}^3 \cdot Y_{\text{э1}} + (\underline{m}_1 Y_{\text{М}}^3 - Y_{\beta}^3) \cdot (Y_{\text{с1}} + Y_{\text{сy1}}) \right]}{Y_{\text{М}}^3} \\ \underline{I}_{\text{л2}} = \underline{I}_{\text{н2}}^I + \underline{I}_{\text{с2}} + \underline{I}_{\text{сy2}} = \frac{\underline{U}_{\text{н1}} \cdot \left[ Y_{\rho}^3 \cdot Y_{\text{э2}} + (\underline{m}_2 Y_{\text{М}}^3 - Y_{\rho}^3) \cdot (Y_{\text{с2}} + Y_{\text{сy2}}) \right]}{Y_{\text{М}}^3}; \\ \underline{I}_{\text{л0}} = \underline{I}_{\text{н0}}^I + \underline{I}_{\text{сy0}} = \frac{\underline{U}_{\text{н1}} \cdot \left[ Y_{\psi}^3 \cdot Y_{\text{э0}} + (\underline{m}_3 Y_{\text{М}}^3 - Y_{\psi}^3) \cdot Y_{\text{сy0}} \right]}{Y_{\text{М}}^3} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{н1}}^I &= \frac{\underline{U}_{\text{н1}} \cdot (\underline{m}_1 \cdot Y_{\text{М}}^3 - Y_{\beta}^3)}{Y_{\text{М}}^3}; \quad \underline{U}_{\text{н2}}^I = \frac{\underline{U}_{\text{н1}} \cdot (\underline{m}_2 \cdot Y_{\text{М}}^3 - Y_{\rho}^3)}{Y_{\text{М}}^3}; \\ \underline{U}_{\text{н0}}^I &= \frac{\underline{U}_{\text{н1}} \cdot (\underline{m}_3 \cdot Y_{\text{М}}^3 - Y_{\psi}^3)}{Y_{\text{М}}^3}. \end{aligned} \quad (17)$$

Комплексные коэффициенты, входящие в выражения (16) и (17), определяются в соответствии с [45].

На основании полученных выражений (16) и (17) возможно определить исследуемые показатели (5), (8), (9). При этом, если обнулить параметры БУ, можно определить исследуемые показатели как при отсутствии БУ в действующей электрической сети, так и при его включении в эту сеть.

Кроме того, представляется возможным определение потерь электрической энергии (мощности) в элементах электрической сети при отсутствии БУ по выражениям:

$$\begin{aligned}\Delta P_L &= l \cdot [r_\Phi \cdot (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) + 9 \cdot I_N^2 \cdot r_N], \\ \Delta P_{PT} &= \Delta P_{ST(idl.)} + \Delta P_{COP.(wind.)} \cdot \beta^2; \\ \Delta Q_{PT} &= \Delta Q_{ST.(mag.)} + \Delta Q_{disp.} \cdot \beta^2,\end{aligned}\quad (18)$$

где  $\Delta P_{ST(idl.)}$  и  $\Delta P_{COP.(wind.)}$  – активные потери в силовом трансформаторе в стали и обмотках

соответственно;  $\Delta Q_{ST.(mag.)} = \sqrt{\left(\frac{I_{idl.} \cdot S_{nom.}}{100}\right)^2 - \Delta P_{ST(idl.)}}$  – реактивные потери намагничивания

сердечника трансформатора;  $\Delta Q_{disp.} \approx \frac{U_{sh.cir} \cdot S_{nom.}}{100}$  – рассеивание потерь реактивной мощ-

ности трансформатора при номинальной нагрузке.

При интеграции БУ в электрическую сеть значения показателей (18) будут определяться по выражениям:

$$\begin{aligned}\Delta P_{БУL} &= \frac{\Delta P_L}{K_{PL.(HPP)}}; \\ \Delta P_{БУPT} &= \frac{\Delta P_{PT}}{K_{PCT.(HPP)}} \cdot K_{PCT.(БУHPP)}; \\ \Delta Q_{БУPT} &= \frac{\Delta Q_{PT}}{K_{P.CT.(HPP)}} \cdot K_{P.(БУHPP)},\end{aligned}\quad (19)$$

где  $K_{PL.БУHPP}$ ,  $K_{PCT.БУHPP}$  – значения коэффициентов потерь, определяемых по выражениям (8) и (9), но при включении БУ в сеть, в этом случае изменяются значения показателей  $K_{2i}$  и  $K_{0i}$ , входящие в эти выражения.

Таким образом, появляется возможность расчета исследуемых величин как при отсутствии, так и при включении БУ в сеть.

Аналогично можно рассчитать и потери активной мощности в ЛЭП при отключении батареи конденсаторов БУ и при ее автоматическом включении, в зависимости от величины  $tg\varphi$ .

При выключенном компенсирующем устройстве:

$$\Delta P_{Lnon.comp.} = l \cdot r_{PH} \cdot I_{non.comp.}^2 \quad (20)$$

При включении БК:

$$\Delta P_{Lnon.comp.} = l \cdot r_{PH} \cdot I_{comp.}^2 \quad (21)$$

В выражениях (20) и (21):

$$I_{non.comp.} = \frac{\sqrt{(P_A+P_B+P_C)^2+(Q_A+Q_B+Q_C)^2}}{\sqrt{3}\cdot U_{nom.}} \text{ и } I_{comp.} = \frac{\sqrt{(P_A+P_B+P_C)^2+(Q_A+Q_B+Q_C-Q_{ku})^2}}{\sqrt{3}\cdot U_{nom.}} - \text{ токи в ЛЭП}$$

до и после подключения батареи конденсаторов.

При этом  $Q_{ku} = (P_A + P_B + P_C)^2 \cdot \left[ \frac{Q_A+Q_B+Q_C}{P_A+P_B+P_C} - 0,35 \right]$  – мощность компенсирующего

устройства (батареи конденсаторов), определяемая в каждый момент исследуемых временных интервалов.

### *Инструменты*

В качестве инструментария расчета несбалансированных режимов предлагается использовать программный комплекс «Unbalance – 3», в котором реализуется описанный в п. 2.2 алгоритм [46].

Программное обеспечение «Unbalance-3» создано на основе объектно-ориентированного языка программирования «C Sharp» (C#). Этот язык программирования разработан в качестве прикладного уровня для CLR (CLR – Common Language Runtime – исполняющая среда для байт-кода CIL (MSIL), в который компилируются программы, написанные на .NET-совместимых языках программирования. CLR – один из основных компонентов пакета Microsoft). Опыт программирования на этом языке уже есть, примером могут служить программный комплекс (ПК) [47], с помощью которого можно осуществлять моделирование и расчет любых ситуаций с изменяющимся уровнем несимметричного электропотребления, а также программа «Unbalance-Modul» [48], позволяющая проводить расчёты несимметричных режимов в действующих электрических сетях также при отсутствии и включении в исследуемой сети средств симметрирования.

Архитектура ПК «Unbalance-3» позволяет осуществлять ориентированное управление тремя составными классами (рис. 3):

*1 класс* – ввод параметров силового трансформатора (СТ): ток холостого хода, напряжение короткого замыкания, мощность холостого хода, номинальная мощность СТ, мощность короткого замыкания, комплексный коэффициент трансформации, полные комплексные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей СТ. В этом же классе проводится ввод полных комплексных сопротивлений прямой (обратной) последовательностей линии высокого напряжения (10 кВ), по которой питание подаётся на обмотку высшего напряжения СТ.

*2 класс* – ввод параметров линии низкого напряжения (0,4 кВ): длина, км; удельные активное и индуктивное сопротивления фазного и нулевого проводников, Ом/км; полные комплексные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей.

*3 класс* – ввод основных параметров, полученных предварительно при измерении сертифицированным прибором: фазные и междуфазные напряжения, фазные токи, десятиминутные временные интервалы, значения активной мощности трёхфазной симметричной нагрузки (двигательная нагрузка), значения коэффициентов гармонических составляющих токов и напряжений для каждой из трёх фаз (до 40-й гармоники включительно), а также углы фазового

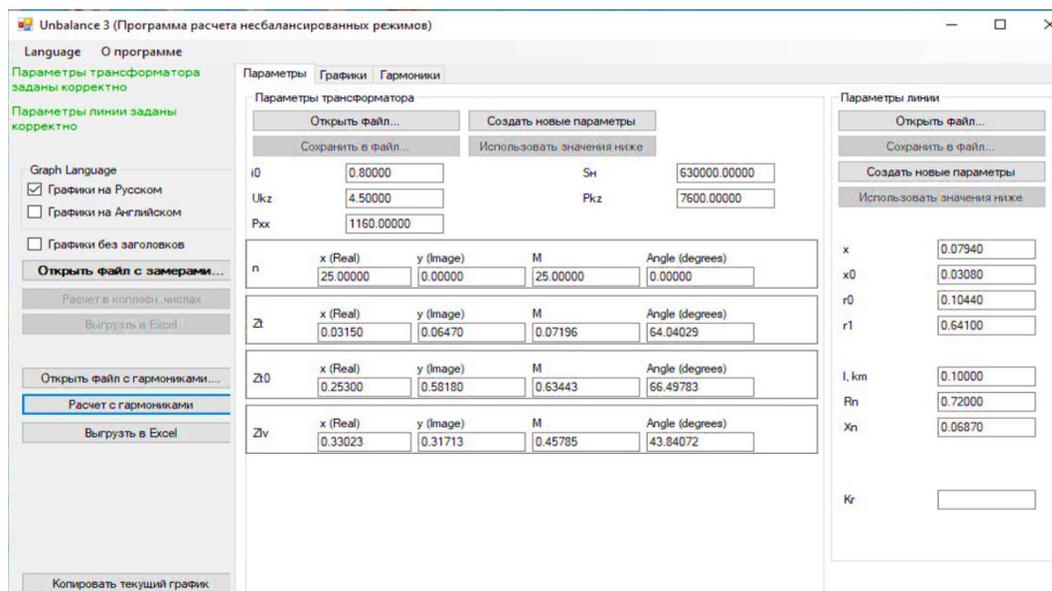


Рис. 3. Окно программы «Unbalance-3» после ввода исходных данных

Fig. 3. The window of the “Imbalance-3” program after entering the initial dat

сдвига между токами и напряжениями соответствующих фаз; потребляемые активная и реактивная мощности. Значения основных параметров вводятся для каждого из 1008 десятиминутных интервалов, в соответствии с [17].

Ряд основных параметров для каждого из 10-минутных интервалов включает в себя 364 значения исходных данных. Кроме того, в этом же классе производится ввод дополнительных данных: комплексного оператора поворота ( $a = e^{-j120^\circ}$ ); комплексного коэффициента ( $e1 = e^{j180^\circ}$ ), заменяющего в алгоритме программы, знак « $\rightarrow$ », а также комплексного коэффициента, равного сопротивлению обратной последовательности симметричной нагрузки в относительных единицах. Для обобщённого узла нагрузки в электрической сети 0,4 кВ, где подключается БУ, этот коэффициент составляет  $0,0735 \cdot e^{j54,689^\circ}$  [45]. Более подробно работа программного комплекса описана в [49].

Машинный анализ исследуемых показателей проводится в каждом цикле решения для каждой из трёх фаз при отсутствии и подключении в сети БУ.

### Апробация и результаты исследований

Исследование НРР с помощью разработанных методов, технического средства и программного обеспечения произведено в действующей системе электроснабжения одного из цехов промышленного предприятия г. Иркутска весной 2023 г. Состав нагрузок данного цеха в основном представлен станочным оборудованием.

Группа станков цеха получает питание от цехового силового распределительного щита, находящегося на расстоянии 100 м от СТ ТМГ630–10/0,4 кВ. На шинах 0,4 кВ СТ был установлен сертифицированный прибор **PQ-701** (рис. 16). Измерения производились в течение одной недели, в соответствии с [17].

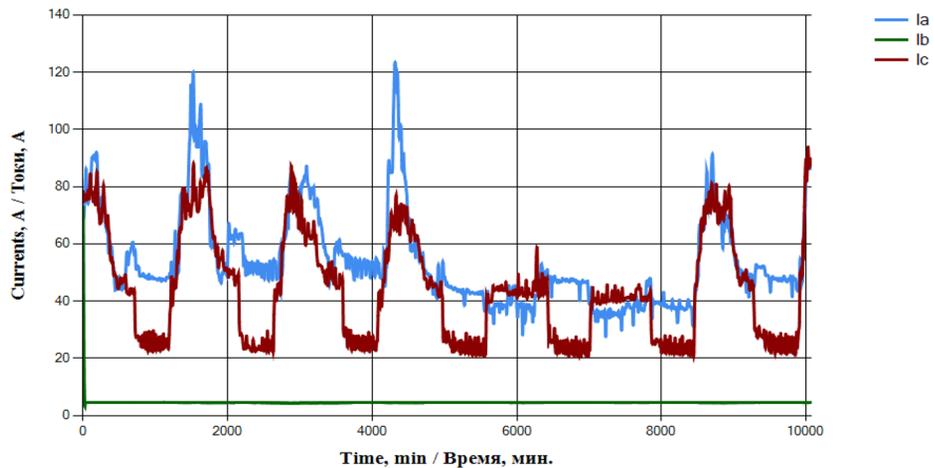


Рис. 4. Временные диаграммы изменения фазных токов в исследуемой системе электроснабжения  
 Fig. 4. Time diagrams of changes in phase currents in the studied power supply system

На рис. 4 представлены диаграммы изменения фазных токов в исследуемой электрической сети. Из диаграмм видно, что загруженность всех трёх фаз существенно отличается. Так, значение<sup>2</sup> тока фазы А (54 А) на 18,5 % превышает ток фазы С (44 А), а фаза В практически не загружена на протяжении всего периода измерений, и ток в ней составляет 4,6 А (на 92 % меньше тока фазы А).

Изменение характера гармонического состава токов показано на диаграмме рис. 5. Из анализа диаграмм следует: несмотря на то, что в каждом из 10-минутных интервалов фиксируется ток, превышающий на 5 % ток прямой последовательности основной частоты, усреднённые

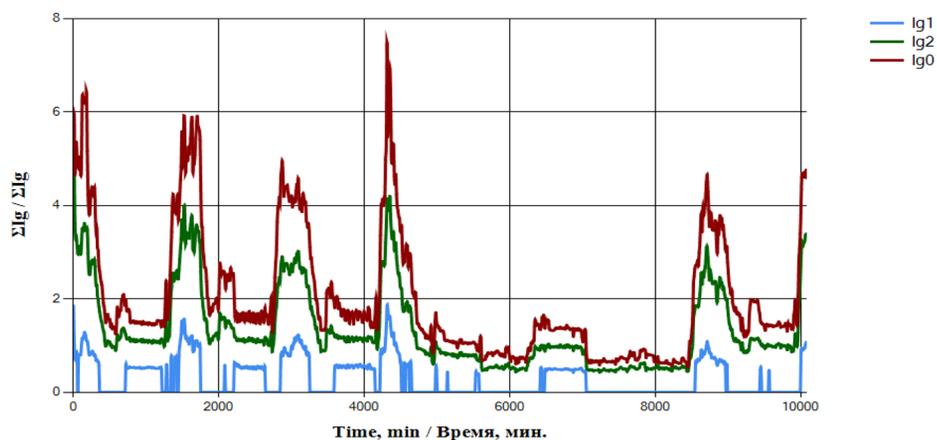


Рис. 5. Временные диаграммы изменения совокупностей P, N и Z-последовательностей  
 Fig. 5. Time diagrams of changes in the aggregates of P, N and Z-sequences

<sup>2</sup> Здесь и далее под значением исследуемого показателя понимается его среднеарифметическое значение за 1008 десятиминутных интервалов, каждое значение которого, в свою очередь, усреднено за 600 с 10-минутного интервала.

за каждый установленный период измерения временного интервала при значениях  $P$ ,  $N$  и  $Z$  последовательностей незначительны: для  $P$ -последовательности – чуть менее 1 % уровня основной гармоники тока основной частоты (при этом для 42 % интервалов измерения ток для этой последовательности равен 0); для  $N$ -последовательности – 4,3 % тока основной частоты, для  $Z$ -последовательности – 6,5 %.

Проведённый анализ показал, что несбалансированность режима работы исследуемой электросети в основном связана с несимметричным электропотреблением.

Тем не менее общая несбалансированность режима работы исследуемой сети приводит к существенному увеличению исследуемых показателей, определяемых по выражениям (4)-(5), (6)-(9), (18)-(19). На рис. 6–8 представлены исследуемые величины при отсутствии в сети БУ.

Анализ рис. 6–8 показал следующее. Коэффициент  $K_{0U}$  (рис. 6а) превышает норму, устанавливаемую стандартом (2 %) [17] в 2,7 раза (среднее значение составляет – с.з. = 5,42 %). Значение коэффициента  $K_{2U}$  практически соответствует стандарту (с.з. = 2,24 %). При подключении в сети БУ значение коэффициента  $K_{0U}$  практически приближается к нулю (с.з. = 0,002 %), а коэффициент  $K_{2U}$  снижается на 98 % (с.з. = 0,044 %) (рис. 6б). То есть по коэффициентам несимметрии напряжений эффект балансировки близок к 100 %.

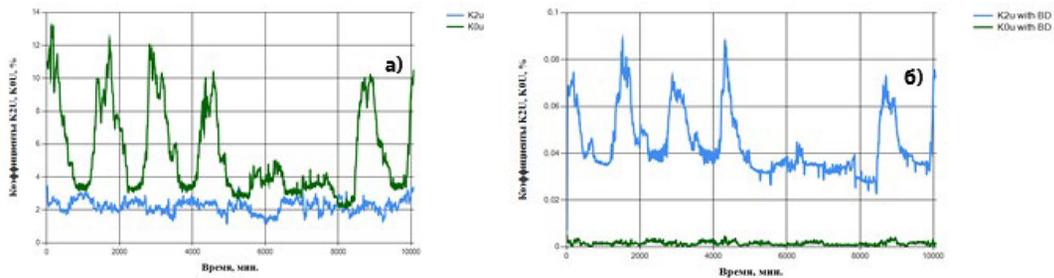


Рис. 6. Временные диаграммы изменения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям в исследуемой электрической сети: а) при отсутствии БУ; б) при подключении в сети БУ

Fig. 6. Time diagrams of changes in the voltage asymmetry coefficients for the reverse and zero sequences in the studied electrical network: a) in the absence of a control unit; b) when connected to a control unit network

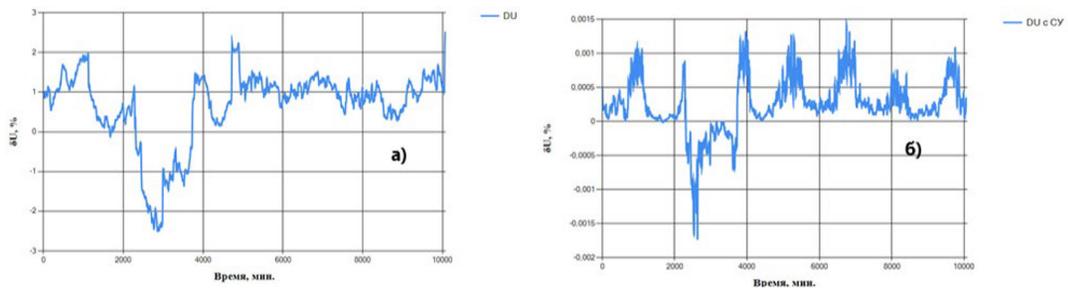


Рис. 7. Временные диаграммы изменения отклонения напряжения в исследуемой электрической сети: а) при отсутствии БУ; б) при подключении в сети БУ

Fig. 7. Time diagrams of changes in voltage deviation in the electrical network under study: a) in the BD is absence; b) when BD connected to the power supply network

Отклонение напряжения электропитания при отсутствии БУ не выходит за установленные пределы, поскольку расстояние от шин РП до станочного оборудования не превышает 30 м, его с.з. составляет 0,66 % (рис. 7а). Тем не менее при включении БУ его среднее значение составило 0,0002 % (рис. 7б), т.е. эффективность БУ для этого показателя качества также близка к 100 %.

Коэффициент потерь мощности до включения устройства составлял 2,65 (рис. 8а), а при включении БУ – 1,18 (рис. 8б). Таким образом, его снижение составило 55,5 %.

Соответствующий эффект балансирования установлен и для потерь активной и реактивной мощности в исследуемой электрической сети (рис. 9–10).

Как видно из анализа рис. 9–10, подключение БУ в исследуемой электрической сети позволило снизить потери активной мощности на 55,7 % (с 3,78 кВт до 1,67 кВт), а потери реактивной мощности на 55,5 % (с 19,33 квар до 8,61 квар). Визуализация изменения потерь активной мощности при использовании батареи конденсаторов в составе БУ не приводится, поскольку расчетами установлено, что для данной электрической сети использование КРМ нецелесообразно, поскольку в основном будут приводить, наоборот, к увеличению активных потерь, так как коэффициент реактивной мощности  $tg\varphi$  практически во всех интервалах времени измерения меньше, чем экономически обоснованное значение (0,35).

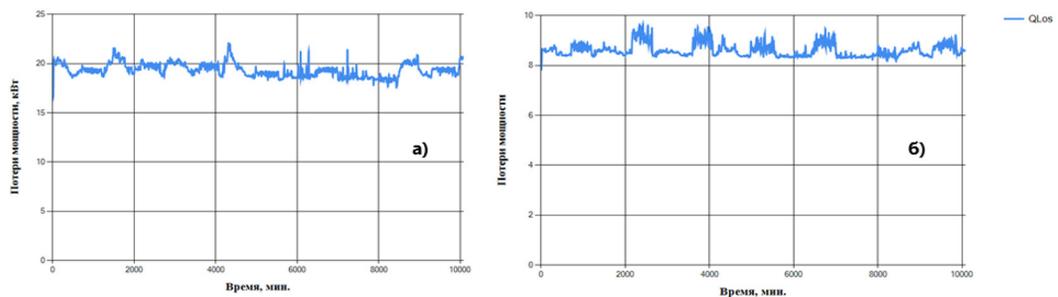


Рис. 8. Временные диаграммы изменения коэффициента потерь в исследуемой электрической сети: а) при отсутствии БУ; б) при подключении в сети БУ

Fig. 8. Time diagrams of changes in the loss coefficient in the studied electrical network: a) in the absence of a BD; b) when BD connected to the network

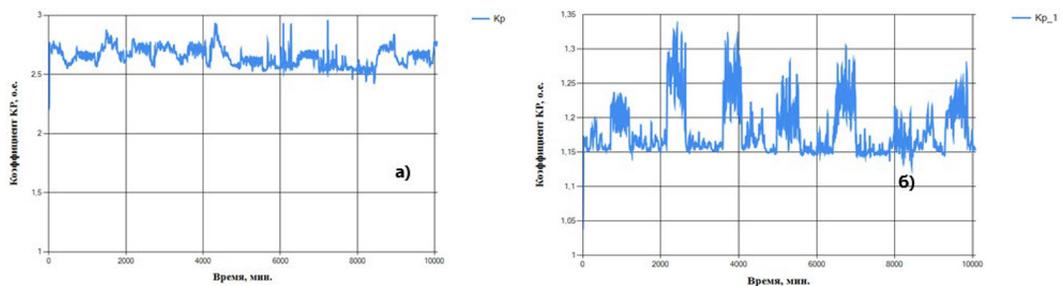


Рис. 9. Временные диаграммы изменения потерь активной мощности в исследуемой электрической сети: а) при отсутствии БУ; б) при подключении в сети БУ

Fig. 9. Time diagrams of changes in active power losses in the studied electrical network: а)BD is absence; б) when BD connected to a power supply network

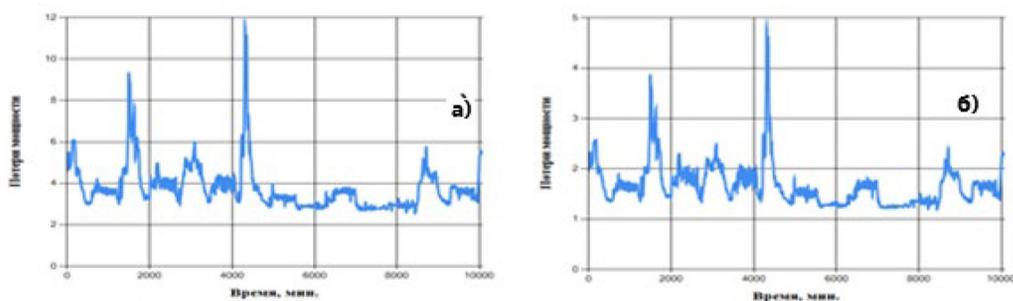


Рис. 10. Временные диаграммы изменения потерь реактивной мощности в исследуемой электрической сети: а) при отсутствии БУ; б) при подключении в сети БУ

Fig. 10. Time diagrams of changes in reactive power losses in the studied electrical network: a) the BD is absence; b) when BD connected to a network

Соответственно, мощность батарей конденсаторов, определяемая по выражению (14), будет иметь отрицательное значение, и при ее вычитании из общего потока, наоборот, будет складываться, увеличивая расчетную  $Q$ ,  $S$ , а следовательно, и рабочий ток, и потери активной мощности. Таким образом, для данной электрической сети включение батарей конденсаторов в составе БУ нецелесообразно.

Подводя итог произведенному исследованию, можно сделать следующие выводы.

1. Режимы работы низковольтных электрических сетей имеют ярко выраженный несбалансированный характер, обусловленный действием симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей основной частоты напряжения электропитания, а также дополнительных соответствующих суммарных прямой, обратной и нулевой последовательностей, обусловленных эмиссией ВГС.

2. Потери электроэнергии, обусловленные несбалансированным электропотреблением, значительно увеличиваются, а её качество снижается.

3. Предложено разработанное универсальное балансирующее устройство, позволяющее снизить показатели качества и более чем на 50 % снизить потери мощности и энергии.

4. Разработанное программное обеспечение расчетов несбалансированных режимов позволяет производить исследование эффективности предлагаемых технических решений для действующих электрических сетей с любыми параметрами.

### Список литературы / References

[1] Абдиева З. Е., Назаров Б. Б. Причины несимметричных режимов в электрических сетях 0,38 кВ, *Наука и инновационные технологии*, 2017, 1(3), 64–67. [Abdieva Z. E., Nazarov B. B. Causes of asymmetric modes in 0.38 kV electrical networks, *Science and innovative technologies*, 2017, 1(3), 64–67. (in Rus.).]

[2] Абдиева З. Э. Оценка влияния несимметрии нагрузки на потери электрической энергии в сетях 0,4 кВ. *Энергетика. Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*, 2014, 32(1), 157–159. [Abdieva Z. E. Evaluation of the effect of load asymmetry on electrical energy losses in 0.4 kV networks. *Energy. Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*, 2014, 32(1), 157–159 (in Rus.).]

[3] Амелькина Н. А., Бодрухина С. С., Цырук С. А. Определение фактического вклада асимметричных потребителей в искажение качества электроэнергии в точке общего подключения. *Электрик*, 2005, 4, 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, 4, 17–21 (in Rus.)].

[4] Ануфриев А. И., Платонов И. Ю., Агеев В. А., Душутин К. А. Анализ асимметрии и отклонения напряжения в распределительных сетях 0,4 кВ. *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузовский сборник научных трудов*, Саранск, 2016, 186–190. [Anufriev A.I., Platonov I. Yu., Ageev V.A., Dushutin K.A. Analysis of asymmetry and voltage deviation in 0.4 kV distribution networks. *Energy-efficient and resource-saving technologies and systems: Interuniversity collection of scientific papers*, Saransk, 2016, 186–190. (in Rus.)].

[5] Гольдштейн В. Г., Сливкин В. Г. Анализ электромагнитной совместимости электроприемников низкого напряжения при несимметричных режимах работы высоковольтных электрических сетей, *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: физико-математические науки*, 2002, 16, 205–208. [Goldstein V.G., Slivkin V.G. Analysis of electromagnetic compatibility of low-voltage electrical receivers in asymmetric modes of operation of high-voltage electrical networks, *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences*, 2002, 16, 205–208. (in Rus.)].

[6] Гамазин С. И., Петрович В. А., Никифорова В. Н. Определение фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии. *Промышленная энергетика*, 2003, 1, 32–38. [Gamazin S.I., Petrovich V.A., Nikiforova V.N. Determination of the actual contribution of the consumer to the distortion of the parameters of the quality of electric energy. *Industrial Energy*, 2003, 1, 32–38 (in Rus.)].

[7] Дед А. В. К вопросу о классификации несимметричных режимов в электрических сетях. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2016, 10(2), 183–185. [Grandfather A. V. On the classification of asymmetric modes in electrical networks. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, 10(2), 183–185 (in Rus.)].

[8] Наумов И. В. К вопросу управления несимметричными режимами работы распределительных электрических сетей 0,38 кВ. *Промышленная энергетика*, 2022, 5, 2–14. [Naumov I. V. On the issue of controlling asymmetric modes of operation of 0.38 kV distribution electric networks. *Industrial Energy*, 2022, 5, 2–14 (in Rus.)].

[9] Костюков Д. А. Оценка вклада потребителя в несимметрию напряжений по нулевой последовательности в точке общего присоединения. *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*, 2018, 6(69), 24–34. [Kostyukov D.A. Assessment of the consumer's contribution to the voltage asymmetry along the zero sequence at the point of common connection. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*, 2018, 6(69), 24–34 (in Rus.)].

[10] Коновалов Ю. В., Воробьев И. И. Анализ качества электроэнергии на предприятии. *Вестник Ангарской государственной технической академии*, 2014, 8, 57–60. [Konovalov Yu.V., Vorobyov I.I. Analysis of the quality of electricity at the enterprise. *Bulletin of the Angarsk State Technical Academy*, 2014, 8, 57–60 (in Rus.)].

[11] Наумов И. В., Багаев А. А. Моделирование режимов несимметричного электропотребления в сельских распределительных электрических сетях 0,38 кВ при многоступенчатом от-

боре мощности. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 2022, 6(212), 90–104. doi.org/10.53083/1996–4277–2022–212–6–90–104. [Naumov I. V., Bagaev A. A. Modeling of asymmetric power consumption modes in rural distribution electric networks of 0.38 kV with multistage power sampling. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2022, 6(212), 90–104 (in Rus.)].

[12] Furfari F. A., Brittain J. Charles Le Geyt Fortescue and the method of symmetrical components. June 2002 IEEE Industry Applications Magazine. 2002. 8(3):7. doi.org/10.1109/MIA.2002.999605.

[13] Косоухов Ф.Д. Методы расчета и анализа показателей несимметрии токов и напряжений в сельских распределительных сетях. *Учеб. Пособие*. Ленинград: ЛСХИ. 1984. 42. [Kosoukhov F. D. Methods of calculation and analysis of current and voltage asymmetry indicators in rural distribution networks. *Studies. Stipend*. Leningrad: LSHI. 1984. 42. (in Rus.)].

[14] *Современная элементная база силовой электроники*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://infopedia.su/12x3f4a.html> (дата обращения: 13.01.2024 г.). [*Modern element base of power electronics*. [Electronic resource]. Access mode: <https://infopedia.su/12x3f4a.html> (date of application: 13.01.2024). (in Rus.)].

[15] *Современная элементная база для систем вторичного электропитания*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studentopedia.ru/tovarovedenie/sovremennaya-elementnaya-baza-dlya-sistem-vtorichnogo-elektropitaniya--specializirovannij-istochnik.html>. (дата обращения: 13.01.2024 г.). [*Modern element base for secondary power supply systems*. [Electronic resource]. Access mode: <https://studentopedia.ru/tovarovedenie/sovremennaya-elementnaya-baza-dlya-sistem-vtorichnogo-elektropitaniya--specializirovannij-istochnik.htm> (date of application: 13.01.2024) (in Rus.)].

[16] *Силовая электроника*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.c1ec64d1-65a20d73-861c6354-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Power\\_electronics](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.c1ec64d1-65a20d73-861c6354-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Power_electronics). (дата обращения: 13.01.2024 г.). [*Power electronics*. [Electronic resource]. Access mode: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.c1ec64d1-65a20d73-861c6354-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Power\\_electronics](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.c1ec64d1-65a20d73-861c6354-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Power_electronics). (date of application: 13.01.2024 (in Rus.)].

[17] ГОСТ 32144–2013. *Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Дата введения 2014.07.01*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 13.01.2024 г.). [*GOST 32144–2013. The interstate standard. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Date of introduction 2014.07.01*. [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (date of application: 13.01.2024) (in Rus.)].

[18] IEEE 1159–2019 – *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. [Electronic resource]. Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8796486>. (Date of application: 13.01.2024 г.).

[19] 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/> (date of application: 13.01.2024 г.).

[20] 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/>; Mach 10, 2023.

[21] ACER. *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](https://acer.europa.eu/Publications/ACER_Security_of_EU_Electricity_Supply_2021.pdf); Apr. 26, 2023.

[22] *Гармонические искажения при работе преобразователей частоты*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vesper.ru/upload/iblock/682/6825635126cb4b492f9dd94ca948bbe8.pdf> (дата обращения: 13.01.2024 г.). [*Harmonic distortion during operation of frequency converters*. [electronic resource]. Access mode: <https://www.vesper.ru/upload/iblock/682/6825635126cb4b492f9dd94ca948bbe8.pdf> (date of application: 13.01.2024) (in Rus.)].

[23] *Прогрессивное электронное оборудование в ухудшении качества электроэнергии*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/7089/> (дата обращения: 14.01.2024 г.). [*Progressive electronic equipment in the deterioration of the power quality*. [Electronic resource]. Access mode: [https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/7089](https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/7089/) (date of application: 14.01.2024) (in Rus.)].

[24] *Станочное оборудование*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.metobr-expo.ru/ru/ui/17162/> (дата обращения: 14.01.2024). [*Machine tools*. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.metobr-expo.ru/ru/ui/17162> (date of request: 14.01.2024 (in Rus.)].

[25] *Современное оборудование для промышленных предприятий*. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.wikistroi.ru/doska/oborudovanie/sovremennoe-oborudovanie-dlya-promyshlennyh-predpriyatii> (дата обращения: 14.01.2024). [*Modern equipment for industrial enterprises*. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.wikistroi.ru/doska/oborudovanie/sovremennoe-oborudovanie-dlya-promyshlennyh-predpriyatii> (date of application: 14.01.2024) (in Rus.)].

[26] *Modern Machining Tools*. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/metal-machining-tools>. Date of application: 14.01.2024 г.

[27] Shane R. *Machine Tools Encyclopedia* (2023 Updated). March 15, 2023. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.machinemfg.com/machine-tools-encyclopedia>. Date of application: 13.01.2024 г.

[28] Edvard B. *5 Main harmonics generators and their determinial effects on indaustrial applications*. [Electronic resource]. Access mode: <https://electrical-engineering-portal.com/5-main-harmonics-generators> (date of application: 14.01.2024).

[29] Hadarig A. I. et al. Experimental analysis of the high-order harmonic components generation in few-layer graphene. *Applied Physics A. Materials Science & Processing*. Springer, 2015, 118, 83–106. DOI 10.1007/s00339–014–8739-y.

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

[31] Коверникова Л. И. Централизованное снижение уровня высших гармоник в сети с нелинейными нагрузками с помощью пассивных фильтров. *Электричество*, 2010, 9, 50–55. [Kovernikova L. I. Centralized reduction of the level of higher harmonics in a network with nonlinear loads using passive filters. *Electricity*, 2010, 9, 50–55. (in Rus.)].

[32] Наумов И. В., Подъячих С. В., Третьяков А. Н. Управление потоками высших гармонических составляющих в цеховых электрических сетях промышленных предприятий. *Грозненский естественнонаучный бюллетень*, 2023, 8, 3(33), 115–124. [Naumov I. V., Podyachikh S. V., Tretyakov A. N. Flow control of higher harmonic components in shop electrical networks of industrial enterprises. *Grozny Natural Science Bulletin*, 2023, 8, 3(33), 115–124. (in Rus.)].

[33] 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, 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 Scientific Research Center*, Yaroslavl, 2018, 15–21 (in Rus.)].

[34] Наумов И. В., Федоринова Э. С., Якупова М. А. Минимизация последствий искажения качества электрической энергии при несимметрично-несинусоидальном электропотреблении. *Промышленная энергетика*, 2023, 3, 52–61. DOI: 10.34831/EP.2023.56.49.007. [Naumov I. V., Fedorinova E. S., Yakupova M. A. Minimizing the consequences of distortion of the quality of electric energy in case of asymmetric-non-sinusoidal power consumption. *Industrial Energy*, 2023, 3, 52–61. DOI: 10.34831/EP.2023.56.49.007. (in Rus.)].

[35] Наумов И. В. Снижение дополнительных потерь, обусловленных несинусоидальными режимами и потоками реактивной мощности в цеховой электрической сети 0,4 кВ. *Энергетик*, 2023, 9, 3–8. [Naumov I. V. Reduction of additional losses caused by non-sinusoidal modes and reactive power flows in the 0.4 kV workshop electrical network. *Energetik*, 2023, 9, 3–8. (in Rus.)].

[36] Косоухов Ф. Д. Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке. *Монография*, Санкт-Петербург-Москва-Краснодар, 2016. 280. [Kosoukhov F. D. Energy saving in low-voltage electrical networks with an asymmetric load. *Monograph*, St. Petersburg-Moscow-Krasnodar, 2016. 280. (in Rus.)].

[37] Наумов И. В. и др. Свидетельство на полезную модель № 26699: (51) МПК 7 Н 02 J 3/26. Выдано 03.06.2002 с формулой: (21)2002114471/20. [Naumov I. V. et al. Utility Model certificate No. 26699: (51) IPC 7 N 02 J 3/26. Issued on 03.06.2002 with the formula: (21)2002114471/20. (in Rus.)].

[38] Наумов И. В. и др. Симметрирующее устройство для трёхфазной четырёхпроводной сети с регулируемыми параметрами. *Патент на полезную модель № 61063. Опубликовано 10.02.2007 Бюл. № 4*. [Naumov I. V. et al. A balancing device for a three-phase four-wire network with adjustable parameters. *Utility model patent No. 61063. Published on 10.02./2007 By Issue No. 4* (in Rus.)].

[39] Наумов И. В. и др. Симметрирующее устройство для трёхфазных сетей с нулевым проводом. *Патент на изобретение № 2490768. Зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ от 20 августа 2013 г.* [Naumov I. V. et al. A balancing device for three-phase networks with a zero wire. Patent for invention No. 2490768. It was registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on August 20, 2013 (in Rus.)].

[40] Наумов И. В. и др. Устройство для симметрирования токов и напряжений с саморегулируемой индуктивностью. *Патент на изобретение (19) RU (11) 2 796 074 (13) C 1 от 16.01.2023. Опубликовано 16.05.2023 Бюл. № 14.* [Naumov I. V. et al. A device for balancing currents and voltages with self-regulating inductance. *Patent for invention (19) RU (11) 2,796,074 (13) C 1 dated 01/16/2023. Published on 05/16/2023 Issue No. 14* (in Rus.).]

[41] Наумов И. В. и др. Шунто-симметрирующее устройство для 3-х фазной электрической сети с нейтральным проводом. *Патент на изобретение № 2819297 ((19) RU (11) 2 819 297(13) C 1) от 16.05.2024.* [Naumov I. V. et al. A shunt is a symmetrical device for a 3-phase electrical network with a neutral wire. *Patent for invention No.2819297 ((19) RU (11) 2,819,297(13) C 1) dated 05/16/2024* (in Rus.).]

[42] Наумов И. В., Подъячих С. В., Еромолаев Д. С. Универсальное балансирующее устройство для четырехпроводных электрических сетей. *Патент на изобретение. № 2811981 C 1 Российская Федерация, МПК H02J 3/26. Опубл. 22.01.2024.* [Naumov I. V., Podyachikh S. V., Ermolaev D. S. Universal balancing device for four-wire electrical networks. *A patent for an invention. No. 2811981 C 1 Russian Federation, IPC H02J 3/26. Published on 22.01./2024* (in Rus.).]

[43] Наумов И. В. Устройство для снижения потерь в электрических сетях с нелинейно-несимметричной нагрузкой. *Электричество*, 2023, 6, 57–66. [Naumov I. V. A device for reducing losses in electrical networks with a nonlinear-asymmetric load. *Electricity*, 2023, 6, 57–66. (in Rus.).]

[44] Кутявин И. Д., Лисецкий Н. В. Расчет фильтров токов прямой и обратной последовательностей. *Известия Томского, ордена трудового красного знамени, политехнического института имени С. М. Кирова*, 1952, Том 72, 55–59. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-filtrov-tokov-pryamoy-i-obratnoy-posledovatelnosti/viewer> (дата обращения: 14.02.2022). [Kutyavin I. D., Lisetsky N. V. Calculation of forward and reverse sequence current filters. *Proceedings of the Tomsk, Order of the Red Banner of Labor, Polytechnic Institute named after S. M. Kirov*, 1952, Volume 72, 55–59. [Electronic resource]. Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-filtrov-tokov-pryamoy-i-obratnoy-posledovatelnosti/viewer> (date of application: 14.02.2022) (in Rus.).]

[45] Наумов И. В. Метод и программа расчёта потерь мощности и показателей несимметрии токов и напряжений в распределительной сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством. *Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства*, 1989, 22–30. [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. *Mechanization and Electrification of Socialist Agriculture*, 1989, 22–30. (in Rus.).]

[46] Наумов И. В. “Unbalance-3”. Программа расчета несбалансированных режимов работы низковольтных электрических сетей. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684122 от 13.11.23 г.* [Naumov I. V. “Imbalance-3». A program for calculating unbalanced operating modes of low-voltage electrical networks. *Certificate of state registration of the computer program No. 2023684122 dated 13.11.23* (in Rus.).]

[47] Наумов И. В., Митягин А. А., Федоринова М. А., Якупова М. А. Программа по моделированию и расчету несимметричных режимов работы электрических сетей 0,38 кВ с распределенной нагрузкой и симметрирующим устройством. *Свидетельство о государственной регистрации Программы для ЭВМ, № 2021667376.* Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 октября 2021 г. [Naumov I. V., Mityagin A. A., Fedorova M. A., Yakupova M. A. A program for modeling and calculating asymmetric modes of operation of 0.38 kV electric networks with a distributed load and a symmetrical device. *Certificate of state registration of a computer program*, No. 2021667376. The date of state registration in the Register of computer programs is October 28, 2021 (in Rus.)].

[48] Наумов И. В., Митягин А. А., Подъячих С. В. Программа “Unbalance-Modul” расчета режимов работы действующих электрических сетей 0,38 кВ с трёхфазной несимметричной нагрузкой и симметрирующим устройством. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667513* от 21.09.2022. [Naumov I. V., Mityagin A. A., Podyachikh S. V. The program “Imbalance-Modul” for calculating the operating modes of existing 0.38 kV electric networks with a three-phase asymmetric load and a symmetrical device. *Certificate of state registration of the computer program* No. 2022667513 dated 21.09.2022 (in Rus.)].

[49] Наумов И. В. Программное обеспечение расчетов несбалансированных режимов в электрических сетях низкого напряжения. *Энергетик*, 2024, 1, 24–30. [Naumov I. V. Software for calculations of unbalanced modes in low voltage electrical networks. *Energetik*, 2024, 1, 24–30 (in Rus.)].