



## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СИММЕТРИРОВАНИЯ НАГРУЗОК В СЕТЯХ 0,4 КВ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКЕ ВДОЛЬ ЛИНИИ

Лыу Куок Кыонг<sup>1,2</sup>, А. М. Маклецов<sup>1</sup>, А. Альзаккар<sup>1,3</sup>, В. В. Максимов<sup>1</sup>,  
И.Ф. Галиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Факультет электротехники и электронной инженерии, Образовательный  
технологический университет Нам Динь, Вьетнам

<sup>3</sup>Университет Аль-Баас, г. Хомс, Сирийская Арабская Республика

*Lqcuong.nute@gmail.com*

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблему несимметрии нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ, вызывающие дополнительные потери электроэнергии. Особое внимание уделить сетям с преимущественно однофазными нагрузками, распределёнными вдоль линий 0,4 кВ. (сельские электрические сети). Произвести анализ методов симметрирования напряжений и нагрузок, как на этапе проектирования электрических сетей, так и в процессе их эксплуатации. Учесть, что даже при правильно спроектированной электрической сети с равномерным распределением однофазных нагрузок по фазам в процессе эксплуатации из-за случайного характера подключения новых нагрузок, включая кратковременные подключения, (например, новых бытовых электроприемников) токовые нагрузки становятся несимметричными. Особое внимание уделяется вопросу симметрирования токов нагрузок путем их переключения с наиболее нагруженных фаз на наименее нагруженные. Такие переключения производятся на опорах ЛЭП с использованием опыта оперативного персонала. Разработать алгоритм симметрирования токовых нагрузок с максимальным исключением человеческого фактора при симметрировании, использующий в качестве исходных данных показания интеллектуальных счетчиков электроэнергии. Основной идеей алгоритма является расчет режимов при возможных переключениях. **МЕТОДЫ.** Алгоритм, использующий предварительные расчеты возможных фазных переключений. При расчете режимов применялся метод Ньютон-Рафсона, реализованный средствами Матлаб. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, рассмотрено влияние несимметрии на работу элементов электрической сети. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Приведены расчеты, обосновывающие основные положения алгоритма оптимизации фазных переключений для симметрирования токовых нагрузок.

**Ключевые слова:** симметрирование; нагрузка; целесообразность; несимметрия; алгоритм.

**Благодарности:** выражаем слова благодарности в адрес кандидата технических наук, доцента А. М. Маклецова за экспертные советы и поддержку на протяжении всей научно-исследовательской работы, а также кандидата технических наук, доцента В.В. Максимова за поддержку по лабораторной части настоящей статьи.

**Для цитирования:** Лыу Куок Кыонг, Маклецов А.М., Альзаккар А., Максимов В.В., Галиев И.Ф. Разработка алгоритма симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кв при распределенной нагрузке вдоль линии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 86-97. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-87-97.

## DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR SYMMETRIZING LOADS IN NETWORKS OF 0.4 KV AT A DISTRIBUTED LOAD ALONG A LINE

Luu Quoc Cuong<sup>1,2</sup>, AM. Makletsov<sup>1</sup>, A. Alzakkar<sup>1,3</sup>, VV. Maksimov<sup>1</sup>, IF. Galiev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Faculty of Electric and Electronic Engineering, Nam Dinh University Of Technology Education, Vietnam

<sup>3</sup>Al-Baath University, Homs, Syrian Arab Republic

*Lquong.nute@gmail.com*

**Abstract:** *PURPOSE.* Consider the problem of unbalance of loads in electrical 0.4 kV networks, causing additional losses of electricity. Particular attention should be paid to networks with predominantly single-phase loads distributed along 0.4 kV lines. (rural electrical networks). To analyze the methods of balancing voltages and loads, both at the stage of designing electrical networks, and during their operation. Keep in mind that even with a properly designed electrical network with a uniform distribution of single-phase loads by phases during operation, due to the random nature of connecting new loads, including short-term connections, (for example, new household electrical receivers), current loads become asymmetric. Particular attention is paid to the issue of balancing load currents by switching them from the most loaded phases to the least loaded ones. Such switching is carried out on power transmission towers using the experience of operating personnel. To develop an algorithm for balancing current loads with the maximum exclusion of the human factor during balancing, using the readings of smart electricity meters as input data. The main idea of the algorithm is the calculation of modes for possible switching. *METHODS.* An algorithm that uses preliminary calculations of possible phase switching. When calculating the modes, the Newton-Raphson method was used, implemented by Matlab program. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, considers the effect of asymmetry on the operation of electrical network elements. *CONCLUSION.* Calculations substantiating the main provisions of the phase switching optimization algorithm for balancing current loads are presented.

**Key words:** *balancing; load; optimization; expediency; asymmetry; algorithm.*

**Acknowledgments:** *We express our gratitude to the Candidate of Technical Sciences, A.M.Makletsov for expert advice and support throughout the research work, as well as the Candidate of Technical Sciences, Professor V.V. Maximov for support in the laboratory part of this article.*

**For citation:** Luu Quoc Cuong, Makletsov AM., Alzakkar A, Maksimov VV, Galiev IF. Development of an algorithm for symmetrizing loads in networks of 0.4 kV at a distributed load along a line. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(2):86-97. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-87-97.

### **Введение**

В электрических 3-х фазных сетях при наличии однофазных нагрузок всегда присутствует их несимметрия, т.е. токи (мощности, напряжения) оказываются неодинаковыми в разных фазах.

Это объясняется непредсказуемым временем включения (отключения) отдельных потребителей (например, бытовых электроприемников).

Автор А.В. Дед [1] в своем исследовании рассмотрел, что коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности могут достигать 30%.

Авторы К.Н. Fadhela и R.T. Abdulmuttalib [2] рассматривают влияние симметрирования нагрузки в системе распределения с использованием алгоритма эвристического поиска.

Авторы J.X. Zhu, M.Y. Chow и F. Zhang [3] представили исследования симметрирования фаза с использованием смешанно-целочисленного программирования. Авторы Ma Kang, Li Ran и Furong Li [4] исследовали оценку в масштабе предприятия дополнительных затрат на симметрирование из-за трехфазного дисбаланса с учетом тепловых ограничений.

Авторы А. Сердимов и И. Протосветский [5] представили средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ. Представленным средством является симметрирующая обмотка для трехстержневого трансформатора. Указанная обмотка наматывается поверх всех трех стержней и в значительной мере компенсирует несимметрию напряжений. Минский трансформаторный завод осуществляет серийное производство таких трансформаторов мощностью до 160 КВА (серия ТМГсу). Трансформаторы такой мощности наиболее востребованы для сельских сетей с распределенной нагрузкой вдоль ЛЭП. Следует отметить, что рассматриваемые трансформаторы симметрируют фазные напряжения, но не токи, поэтому их применение лишь частично снимает вопрос увеличения потерь электроэнергии.

Авторы А.И. Орлов, С.В. Волков и А.А. Савельев [6] представили анализ влияния различных схем соединения фазных обмоток на показатели симметрии электрической сети. Авторы I. Maslov, G. Maslova, A. Ishalin и M. Novoselova [7] представили анализ мер по обеспечению качества электроэнергии симметрирующих трансформаторов 10/0,4 кВ.

Авторами А.И. Орлов, С.В. Волков [8] представлены исследования алгоритмов управления устройствами балансировки нагрузки в их групповой работе. Авторы А.М. Маклецов, И.Ф. Галиев, Р.И. Галиев и Лыу Куок Кыонг [9] представлены исследования по мониторингу несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ. К. Mansouri, M. Ben Hamed, L. Sbita и M. Dhaoui [10] представлены исследования по трёхфазному симметрированию в интеллектуальных сетях распределения низкого напряжения с использованием изменения потока электрической нагрузки: «L.F.V.M.».

Симметрирование нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ производят как на стадии проектирования сетей. так и при их эксплуатации. На стадии проектирования стараются равномерно распределить прогнозируемые нагрузки по фазам. После включения ЛЭП в эксплуатацию производят замеры токовых нагрузок и вводят корректирующие симметрирующие переключения.

По мере изменения нагрузок такие переключения повторяются. В последнее время появилась возможность мониторинга нагрузок каждого потребителя (интеллектуальные счетчики электроэнергии с регистрацией профилей токов). В статье показано, что в качестве исходных данных для расчетов потерь электроэнергии необходимо использовать среднеквадратичные токи всех потребителей, распределенных вдоль ЛЭП за неделю, включая выходные дни.

*Научная значимость результатов* представленной работы определяется обоснованием порядка симметрирования (начиная с конца ЛЭП). На каждом этапе симметрирования расчет режимов определяется разработанной авторами программой для расчета потерь в четырехпроводной сети, использующей известный метод узловых напряжений и математическое моделирование в среде Матлаб (номер принятой заявки на регистрацию программы 2022618431 от 06.05.2022 г.). Расчеты проводились для ВЛ 0,4 кВ стандартной длины (600 метров, 15 опор).

*Практическая значимость результатов* работы определяется снижением времени симметрирования, осуществляемым оперативным персоналом за счет получения расчетных потерь электроэнергии при допустимых переключениях до производства реальных симметрирующих переключений.

В известной литературе исследованной авторами предлагаемый подход к решению задачи симметрирования нагрузок не рассмотрен.

**Материалы и методы**

Несимметрия нагрузок отрицательно сказывается на работе потребителей и электрической сети, в основном, по следующим причинам:

1. Наличие дополнительных потерь электроэнергии в нулевом проводе. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе отсутствует;
2. Наличие дополнительных потерь в электродвигателях из-за появления вращающегося электрического поля обратного направления;
3. Наличие дополнительных потерь в трансформаторах из-за замыкания потоков нулевой последовательности через бак и крышку трансформатора;
4. Неодинаковая загрузка фаз ЛЭП. На рис. 1 представлены постоянные и неодинаковые суточные нагрузки трех фаз ( $I_A=10A$ ;  $I_B=9A$ ;  $I_C=8A$ ) – режим 1 и средняя  $I_{cp}$ , если все три фазы нагружены одинаково – режим 2.

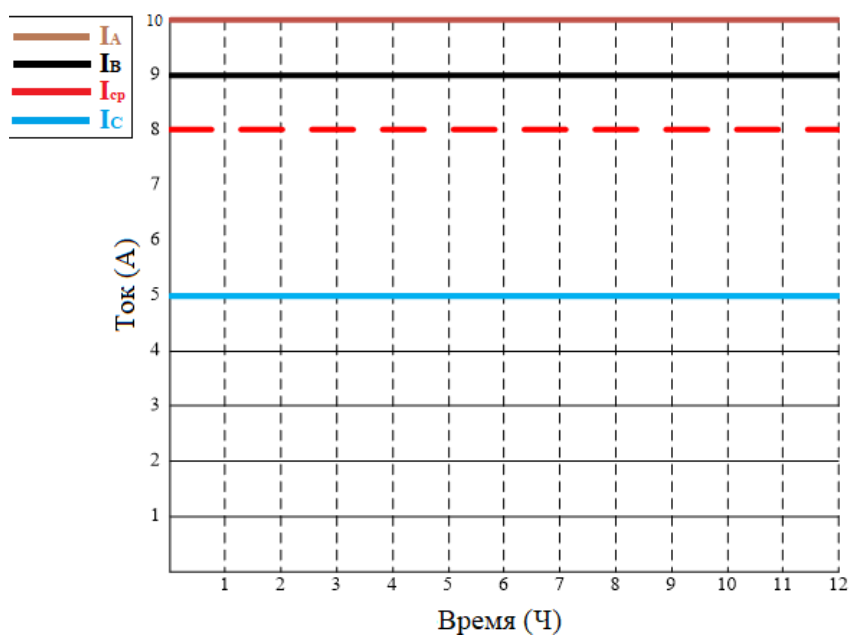


Рис.1. Фазные и средний токи линии.

Fig.1. Phase and middle current lines.

Следует отметить, что без учета потерь электроэнергия, передаваемая по ЛЭП в обоих режимах одинакова, если принять равенство:

$$I_{cp} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \tag{1}$$

$$I_{cp} = 8 \text{ A}$$

Предположим, что активное сопротивление линии  $R=1 \text{ }\Omega$  (для упрощения расчетов). Тогда потери мощности в ЛЭП при неодинаковых токах в фазных проводах:

$$\Delta P_n = I_A^2 \cdot R + I_B^2 \cdot R + I_C^2 \cdot R \tag{2}$$

$$\Delta P_n = 206 \text{ Вт}$$

В режиме 2 потери мощности:

$$\Delta P_{cp} = 3I_{cp}^2 \cdot R \tag{3}$$

$$\Delta P_{cp} = 192 \text{ Вт}$$

Неравенство  $\Delta P_{cp} < \Delta P_n$  выполняется всегда, как и в случае выравнивания графиков нагрузки передающих элементов электрических сетей. Кроме увеличения потерь

электроэнергии несимметрия нагрузок ограничивает пропускную способность ЛЭП. Несимметрия напряжений усложняет также подключение к электрической сети распределенной генерации.

Дополнительные потери электроэнергии от несимметрии нагрузок могут составлять до 30% от общих потерь. Кроме того, несимметрия нагрузок может привести к недопустимому снижению напряжения сильно нагруженных фаз, регламентируемом ГОСТ 321144-2013, что вызывает жалобы потребителей на качество электроэнергии. Финансовые риски в работу сетевых предприятий вносят обрывы нулевого провода при наличии несимметрии нагрузок.

Таким образом, симметрирование нагрузок сетей 0,4 кВ является актуальной задачей, что отражено и в руководящих документах электросетевых предприятий, например, РД «Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений» -мероприятие 1.10 «Выравнивание нагрузок фаз в электрических сетях 0,38 кВ». Однако задача симметрирования нагрузок оказывается достаточно сложной, решение которой требует новых методологических подходов и применения новых технических устройств [11, 12].

Определить наиболее нагруженную фазу во время контрольных замеров (6 раз в сутки, 2 раза в год) однозначно можно только при значительной разнице фазных токов [13, 14].

На рис.2 представлен пофазный суточный график нагрузки многоквартирного типового жилого дома в г. Казани. электроэнергии (RESURS UF) Анализ графика позволяет сделать следующие выводы: График был получен при суточном мониторинге нагрузок прибором для измерения показателей качества

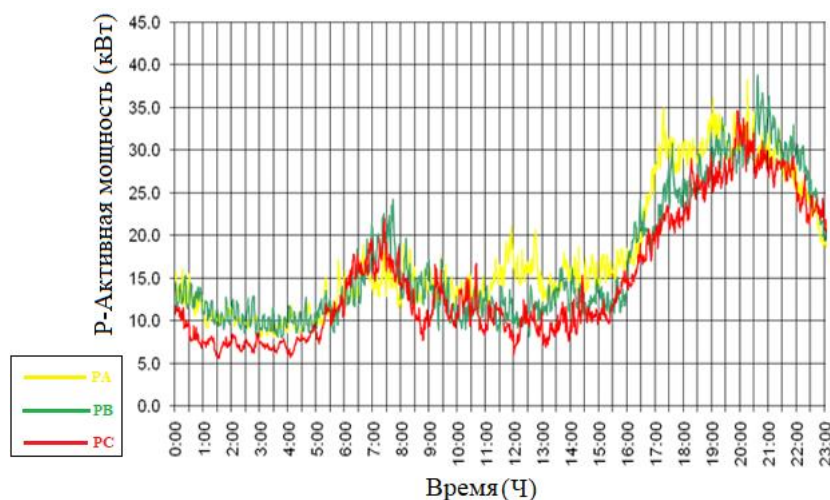


Рис.2. Пофазный суточный график нагрузки многоквартирного жилого дома Fig.2. Phase daily load schedule of apartment building

Анализ графика позволяет сделать следующие выводы: График был получен при суточном мониторинге нагрузок прибором для измерения показателей качества

1. Определить наиболее нагруженную фазу при использовании только результатов контрольных замеров
2. Оказывается, нецелесообразным определять относительные нагрузки фаз и с помощью интегрирующих приборов -интеллектуальных счетчиков электроэнергии, устанавливаемых у каждого потребителя.
3. В электрических сетях РТ установлено уже несколько тысяч таких счетчиков. При этом программное обеспечение высшего уровня позволит определить нагрузки фаз, пропорциональные потребленной за неделю электроэнергии с учетом выходных дней. Однако рассматриваемый подход оказывается неприемлемым из-за квадратичной

зависимости потерь мощности от тока. На рис.3 показан простейший пример нагрузок двух фаз А и В.

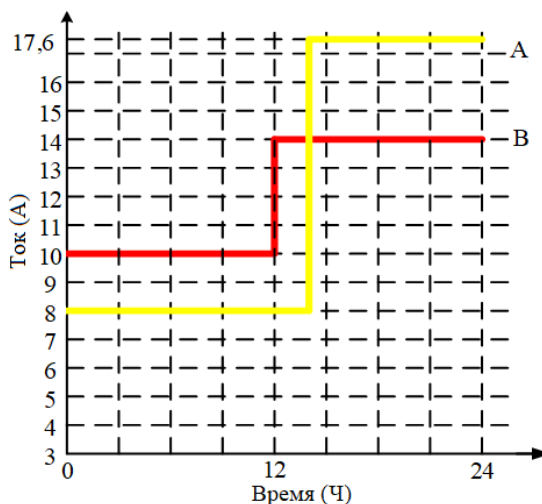


Рис.3. Нагрузки фаза А и В при разной степени загрузки в разное время. Fig.3. Load phases A and B at different loads at different times.

По этим фазам в течении суток передается одинаковое количество электроэнергии (площади графиков, очерченных ломаными кривыми, равны).

Из рисунке 3, Фаз (А):

$$\begin{aligned} \Delta P_A &= I_{A1}^2 \cdot t_{A1} + I_{A2}^2 \cdot t_{A2} \\ \Delta P_A &= 8^2 \times 12 + 17.6^2 \times 10 \\ \Delta P_A &= 3993,6 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (4)$$

Из рисунке 3, Фаз (В):

$$\begin{aligned} \Delta P_B &= I_{B1}^2 \cdot t_{B1} + I_{B2}^2 \cdot t_{B2} \\ \Delta P_B &= 10^2 \times 12 + 14^2 \times 12 \\ \Delta P_B &= 3552 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (5)$$

Однако, потери электроэнергии при условном сопротивлении проводов 1 Ω в фазе А составляют 3993 Вт, а в фазе В-3552 Вт. Таким образом, нагружая менее нагруженную фазу, руководствуясь показаниями счетчиков электроэнергии за определенный период, имеется вероятность увеличения потерь электроэнергии. С учетом вышесказанного, для определения относительной загруженности фаз целесообразно использовать информацию о токах нагрузок, получаемую также от интеллектуальных счетчиков. При этом программное обеспечение будет определять относительные нагрузки фаз по среднеквадратичным токам.

Увеличение электромагнитной энергии, потребляемой бытовыми электроприемниками (двигатели, микроволновые печи) приводит к быстрому росту потребляемой реактивной мощности. На рисунке 4 представлено суточное потребление активной и реактивной мощности типового многоквартирного дома.

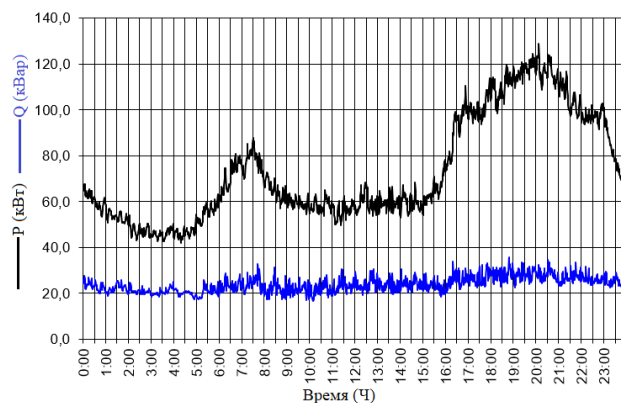


Рис. 4. Суточное потребление активной и реактивной мощности типового многоквартирного дома

Fig. 4. Daily consumption of active and reactive capacity of a typical apartment building

Следует отметить, что рост потребления реактивной мощности растет быстрее, чем активной. Причем потребление реактивной мощности также несимметрично. В то же время симметрирование реактивной нагрузки может быть осуществлено конденсаторами, уменьшающими потребление реактивной мощности, а значит, и потери электроэнергии от ее перетоков, что, очевидно, и будет исполняться по мере интеллектуализации электроэнергетических систем.

Для снижения влияния несимметрии нагрузок на потери электроэнергии и ее качество в электрических сетях наиболее часто применяется следующее:

1. Симметрирование режимов путем переключения оперативным персоналом нагрузок с наиболее загруженных фаз на менее загруженные;
2. Применение трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда зигзаг» (Y/Zn). Кроме симметрирования напряжений указанные трансформаторы увеличивают токи однофазных коротких замыканий, что повышает надежность работы сети.
3. Применение симметрирующих устройств, например, трансформаторов с симметрирующими обмотками (ТМГсу) [15].
4. Автоматические переключающие устройства мощности [16]. Указанные устройства при необходимости автоматически переключают часть нагрузки с одной фазы на другую. Однако указанные устройства либо имеют ограниченную мощность, недостаточную для выравнивания токов всей ЛЭП, либо требуют установки на каждой опоре, что требует значительных затрат.

Для оценки целесообразности симметрирования при отсутствии мониторинга измерений у потребителей ранее предлагалось использовать коэффициент добавочных потерь [17]. Однако указанная методика не учитывает характер распределения нагрузки вдоль ЛЭП и вносит в расчеты потерь существенную погрешность.

В настоящее время алгоритм симметрирования (выбора мест переключения нагрузок на другие фазы) основан исключительно на опыте оперативного персонала. Математически сформулировать задачу оптимизации симметрирования очень сложно из-за ступенчатости изменения токов по фазам при переключениях, например, нагрузка 5А переключается с фазы А на фазу С. При этом целевая функция – потери электроэнергии прерывиста и недифференцируема [18].

В данной работе предлагается алгоритм симметрирования с использованием мониторинга показаний счетчиков электроэнергии у каждого потребителя с частотой опроса 10 мин (ГОСТ 321144-2013).

Мониторинг счетчиков у потребителей и счетчиков в начала ЛЭП позволяет контролировать потребление электроэнергии, как с частотой 10 мин., так и интегрированные потери для определения среднеквадратичных токовых нагрузок фаз.

Для расчета потерь в четырехпроводной сети была разработана специальная программа, использующая известный метод узловых напряжений и математическое

моделирование в среде Матлаб (номер принятой заявки на регистрацию программы 2022618431 от 06.05.2022 г.). Расчеты проводились для ВЛ 0,4 кВ стандартной длины (600 метров, 15 опор) [19, 20].

На рисунке 5 приведены результаты расчетов с поочередным переносом несимметричной нагрузки ( $I_a=2,99A$ ,  $I_b=1,27A$ ,  $I_c=0,84A$ ) с опоры №15 до опоры №9.

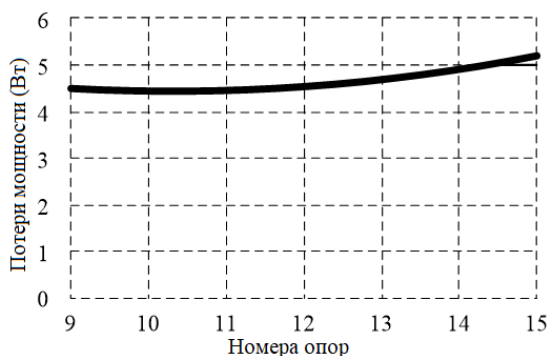


Рис.5. Потери мощности при наличии несимметричной нагрузки на разных опорах ЛЭП *Fig. 5. Power losses due to asymmetric load on different power transmission poles*

**Результаты**

Расчеты показали, что чем ближе несимметричная нагрузка к концу ЛЭП, тем больший эффект дает симметрирование. Поэтому оперативному персоналу при выполнении операции симметрирования необходимо начинать ее с конца ЛЭП. Наличие постоянного мониторинга режима и возможность программного прогнозирования режимов при различных вариантах симметрирования также позволяют оперативному персоналу выбирать оптимальный вариант переключения фазных нагрузок.

На рис. 6 в качестве примера представлен участок схемы 4-х проводной электрической сети с тремя опорами. Именно переключениями на опорах (в точках отпуска электроэнергии) осуществляется симметрирование нагрузок оперативным персоналом.

На схеме цифрами обозначены значения токов нагрузок и суммарные токи фаз А, В, С ЛЭП. Наиболее нагруженной является фаза В. Для симметрирования необходимо часть нагрузки фазы В переключить на менее нагруженную фазу, например А. Так как симметрирование целесообразно начинать с конца ЛЭП, то в рассматриваемом примере предлагается сравнить два варианта переключения, показанные на схеме пунктирными стрелками 1 и 2. В первом случае на фазу А переключается токовая нагрузка 27,5 А, а во втором - 31,4 А. Разработанное программное обеспечение позволяет произвести эти переключения виртуально, а в полученных новых режимах определить величину потерь мощности.

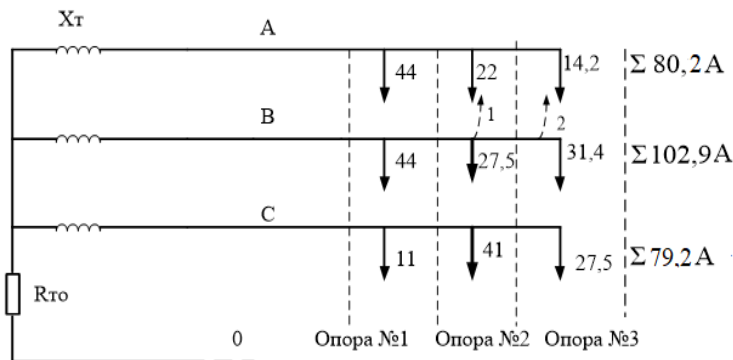


Рис.6. Симметрирование нагрузки.

*Fig.6. Symmetrization of the load*

В результате расчетов получено:

1. Потери мощности без симметрирования равны 6,84 Вт;



2. При симметрировании на опоре №2 – 4,78 Вт;

3. При симметрировании на опоре №3 – 2,72 Вт.

В рассматриваемом случае по критерию минимума потерь мощности симметрирование целесообразно проводить на опоре №2. Результаты расчетов расчетов зависят от места переключений и от переключаемых мощностей. Однако, в любом случае, расчетная оценка значимости возможных переключений существенно снизит трудоемкость симметрирования и повысит его эффективность.

#### **Заключение**

Полученные результаты работы позволяют предложить следующий алгоритм симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ:

1. По показателям токов счетчиков электроэнергии (за неделю) определить среднеквадратичные токовые нагрузки фаз. Информация о токах автоматически получается из комплекса «Пирамида»;

2. Начиная с конца ЛЭП, перебираются возможные варианты симметрирующих переключений;

3. При выборе вариантов используется опыт оперативного персонала. Возможен полный перебор вариантов для переключений на каждой опоре, или двух соседних опорах (такие переключения во многих случаях возможны)

4. Для выбранных вариантов с помощью разработанного программного обеспечения рассчитываются потери мощности;

5. Для каждой опоры определяется оптимальный с точки зрения потерь мощности вариант симметрирующих переключений.

#### **Литература**

1 Дед. А. В. К проблеме современного состояния уровней показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,4 кВ // Омский научный вестник, Т. 20. № 2. 2014. 135 с.

2. K.H. Fadhela and R. T. Abdulmuttalib. Load Balancing in Distribution System Using Heuristic Search Algorithm // International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications (ICASEA), Wasit University, Kut, Iraq, 2018. P. 48-53.

3. J.X. Zhu, M.Y. Chow and F. Zhang. Phase Balancing using Mixed-Integer Programming // IEEE Transactions on Power Systems Vol 13. № 4, 1998. P. 1487-1492.

4. Ma Kang, Li Ran and Furong Li, Utility-scale estimation of additional reinforcement cost from three-phase imbalance considering thermal constraints // IEEE Transactions on Power Systems. 2017. V. 32. № 5. pp. 912–3923.

5. Сердимов А., Протосветский И. Симметрирующее устройство для трансформаторов. Средство для стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ // Новости электротехники, № 1(31), 2005. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/14.php>.

6. Орлов А.И., Волков С.В. и Савельев А.А. Силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ. Области применения разных схем соединения обмоток // Новости электротехники. 2006. № 5(41), [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/41/09.php>.

7. I. Maslov, G. Maslova, A. Ishalin и M. Novoselova, Power Quality Assurance with Balancing Transformers 10/0.4 kW // International Conference on Electro Technical Complexes and Systems (ICOECS), 2022, DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657254.

8. Орлов А.И., Волков С.В. Сравнение алгоритмов управления устройствами выравнивания нагрузки при их групповой работе // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 93–101.

9. Маклецов А.М., Галиев И.Ф., Галиев Р.И., Лью Куок Кьонг. Мониторинг несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ. // Энергетик журнал. 2019. №5. С. 6-25.

10. M. Ben Hamed, L. Sbita и M. Dhaoui, Three-phase balancing in a LV distribution smart-grids using electrical load flow variation: “L.F.B.M.” // International Conference on

Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA) 2017 P. 427-431.

11. Валеев И.М., Альзаккар А. Гармоники и их влияние при определении метода компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Вестник Казанского технологического университета. 2020. № 12. С. 24-39.

12. Карчин В.В., Сидорова В.Т., Леухин А.Н. Улучшение показателей качества электроэнергии в сельских распределительных сетях 0,4 кВ с помощью компенсации реактивной мощности // Журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2015. № 1-2. С. 61-67.

13. Альзаккар А., Местников Н.П., Валеев И.М. Анализ динамического воздействия электрического соединения на устойчивость угла ротора для синхронных генераторов в электроэнергетической системе Сирии // Журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 120-133.

14. Лыкин А.В., Уткин Е.А. Распределительные электрические сети 10/0,4 кВ с максимальным приближением трансформаторных подстанций к потребителям // Журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2019. Т. 2. № 3. С. 46-54.

15. Смолич Е., Журавлев В. Эксплуатация городских сетей // Новости электротехники. 2021. № 2(128). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2021/128-129/>.

16. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Анализ влияния устройства выравнивания нагрузки на показатели несимметрии электрической сети. // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 100-108.

17. Воротницкий В.Э., Железко Ю.С., Максимов В.М. РД 34.09.254 Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений // Разработано Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ). 1986. 43 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cutt.us/gostovnet>.

18. Карчин В. В., Сидорова В.Т., Федотов А.И. Компенсация реактивной мощности в сельских распределительных сетях 0,4 кВ для улучшения качества электроэнергии // Журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2015. № 5-6. С. 101-106.

19. N. Mestnikov, A. Alzakkar, I. Valeev, V. Maksimov, Assessment of the Performance of the Solar Power Plant with a Capacity 150W // International Russian Automation Conference, 2021. P. 404-408.

20. V. Ziryukin, R. Solopov, A. Usanov. The 0.4 kV Automatic Balancing Device Model // International Russian Automation Conference, 2021. P. 719-727.

#### **Авторы публикации**

**Льву Куок Кыонг** – магистр техники и технологий, аспирант, преподаватель Института электроэнергетики «Казанский государственный энергетический университет», факультета электротехники и электронной инженерии, Образовательный технологический университет Нам Динь, Вьетнам. E-mail: [Lqcuong.nute@gmail.com](mailto:Lqcuong.nute@gmail.com)

**Маклецов Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: [Mac.am@mail.ru](mailto:Mac.am@mail.ru).

**Максимов Виктор Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: [Viktor.maksimov.1968@mail.ru](mailto:Viktor.maksimov.1968@mail.ru).

**Альзаккар Ахмад** – магистр техники и технологий, аспирант, Казанский государственный энергетический университет. Преподаватель Университета Аль-Баас. E-mail: [Ahmadalzakkar86@gmail.com](mailto:Ahmadalzakkar86@gmail.com).

**Галиев Ильгиз Фанзилович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: [Esis.kgeu@bk.ru](mailto:Esis.kgeu@bk.ru).

### References

1. A.V. Ded, On the problem of the current state of the levels of indicators of asymmetry of voltages and currents in 0.4 kV networks. *Omsk Scientific Bulletin*. 2014;20(2):135.
2. K.H. Fadhela and R. T. Abdulmuttalib, *Load Balancing in Distribution System Using Heuristic Search Algorithm, International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications (ICASEA)*. Wasit University, Kut, Iraq, (2018). pp. 48-53.
3. J.X. Zhu, M.Y. Chow and F. Zhang. *Phase Balancing using Mixed-Integer Programming*. IEEE Transactions on Power Systems.1998;13(4):1487-1492.
4. Ma Kang, Li Ran and Furong Li, *Utility-scale estimation of additional reinforcement cost from three-phase imbalance considering thermal constraints*. IEEE Transactions on Power Systems. 2017;32(5):912–3923.
5. A. Serdimov, I. Protosvetsky, Balancing device for transformers. Means for voltage stabilization and loss reduction in 0.4 kV networks. *News of Electrical Engineering*. 2005. №. 1(31).[Online]. Available: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/14.php>.
6. A.I. Orlov, S.V. Volkov and A.A. Saveliev, silt transformers 10 (6) / 0.4 kV. Application areas of different winding connection schemes. *Electrical Engineering News*. 2006. No. 5(41). [Online]. Available: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/41/09.php>.
7. I. Maslov, G. Maslova, A. Ishalin и M. Novoselova, Power Quality Assurance with Balancing Transformers 10/0.4 Kw. *International Conference on Electro Technical Complexes and Systems*. (2022). doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657254.
8. A.I. Orlov, S.V. Volkov. Comparison of control algorithms for load balancing devices during their group work. *Bulletin of the Chuvash University*. 2018;3:93–101.
9. A. M. Makletsov, I. F. Galiev, R. I. Galiev, Luu Quoc Cuong, Monitoring of load unbalance in 0.4 kV networks. *Energetik Journal*. 2019;5:6-25.
10. M. Ben Hamed, L. Sbita и M. Dhaoui. *Three-phase balancing in a LV distribution smart-grids using electrical load flow variation: «L.F.B.M.» International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering*. (2017). P. 427-431.
11. I. M. Valeev, A. Alzakkar, Harmonicas and their Influence When Determining the Method of Compensation of Jet Power in Electrical Networks. *Vestnik of Kazan State Power Engineering University*. 202;12(1 (45):24-39.
12. V.V. Karchin, V.T. Sidorova, A.N. Leukhin. Improving the quality of electricity in rural distribution networks 0.4 kV using reactive power compensation. *Journal of Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;1-2:61-67.
13. A. Alzakkar, N. P. Mestnikov, F. Alhajj Hassan, I. M. Valeev. Analysis of the dynamic effect of the electrical interconnection on the stability of the rotor angle for synchronous generators in the electric power system of Syria. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(4):120-133.
14. A.V. Lykin, E.A Utkin, Ower distribution networks with the maximal nearby location of transformer substations to consumers, *Journal of Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(3):46-54.
15. E. Smolich, V. Zhuravlev. Operation of urban networks. *News of electrical engineerin*, 2021;2(128). [Online]. Available: <http://www.news.elteh.ru/arh/2021/128-129/>.

16. A. Orlov, S. Volkov, A. Savelyev, Analysis of influence of load balancing unit on indicators of power supply unbalance, Vestnik of the Chuvash University. № 3. (2016). P. 100-108.

17. V.E. Vorotnitsky, Yu.S. Zhelezko, V.M. Maksimov. RD 34.09.254 *Instructions for reducing the technological consumption of electrical energy for transmission through electrical networks of power systems and power associations*. Developed by the All-Union Scientific Research Institute of Electric Power Industry. (1986). 43 p. [Online]. Available: <https://cutt.us/gostovnet>.

18. V.V. Karchin, V.T. Sidorova, A.I. Fedotov, Reactive power compensation in the village distribution networks 0,4 kv to improve power quality, *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;5-6:101-106.

19. N. Mestnikov, A. Alzakkar, I. Valeev, V. Maksimov, Assessment of the Performance of the Solar Power Plant with a Capacity 150W, International Russian Automation Conference, (2021). P. 404-408.

20. V. Ziryukin, R. Solopov, A. Usanov. The 0.4 kV Automatic Balancing Device Model, International Russian Automation Conference (2021). P. 719-727.

#### **Authors of the publication**

*Luu Quoc Cuong* – Kazan State Power Engineering University.

*Aleksandr M. Makletsov* – Kazan State Power Engineering University.

*Akhmad Alzakkar* – Kazan State Power Engineering University.

*Victor V. Maksimov* – Kazan State Power Engineering University.

*Pgiz. F. Galiev* – Kazan State Power Engineering University.

**Получено**

**25.03.2022г.**

**Отредактировано**

**14.04.2022г.**

**Принято**

**21.04.2022г.**