

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.316.11

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-216-10-72-81

И.В. Наумов, А.А. Багаев,
С.В. Подъячих, А.Н. Третьяков
I.V. Naumov, A.A. Bagaev,
S.V. Podiachikh, A.N. Tretyakov

О ЦИФРОВОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ В СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

ON DIGITAL SUPPORT FOR CALCULATIONS OF ASYMMETRIC MODES IN RURAL DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

Ключевые слова: несимметрия токов и напряжений, качество электроэнергии дополнительные потери электроэнергии, цифровое обеспечение расчетов, симметрирующее устройство.

Анализируются результаты практических измерений в действующей распределительной электрической сети напряжением 0,38 кВ. При использовании специального сертифицированного прибора получены численные значения параметров электрической энергии, на основании которых определены критерии оценки показателей качества электрической энергии и её дополнительных потерь, обусловленных несимметричным потреблением. На основе разработанных авторами методов и программ представлено цифровое обеспечение расчетов несимметричных режимов, которое позволило установить высокий уровень несимметрии токов и напряжений в исследуемой электрической сети. Полученные результаты показали, что возникающие, вследствие несимметрии токов, дополнительные потери мощности и энергии повышают уровень энергопотребления, чем снижают эффективность использования электрической энергии. Созданная авторами цифровая технология позволила произвести расчеты, подтверждающие эффективность средств симметрирования, в качестве которого авторами предлагается новый тип симметрирующего устройства, включение которого в определенной точке электрической сети обеспечивает значительную минимизацию токов нулевой последовательности. Доказано, что снижение потоков нулевой последовательности приводит к существенному улучшению показателей, характеризующих качество и дополнительные потери электрической энергии. В качестве методологической основы авторами используется теория электрических цепей, модульный метод расчета

показателей несимметрии токов и напряжений, а также методы численного анализа. Для визуализации результатов исследования авторами использованы современные технологии графического редактора MATLAB. Установлено, что использование предлагаемого симметрирующего устройства на одном из объектов электрических сетей 0,38 кВ Иркутской области в значительной степени позволяет повысить эффективность использования электрической энергии. Результаты исследования могут быть полезны научным работникам, занимающимся исследованиями режимов работы действующих электрических сетей.

Keywords: current and voltage asymmetry, power quality, additional losses of electricity, digital software for calculations, balancing device.

The results of practical measurements in the operating electrical distribution network with a voltage of 0.38 kV are analyzed. Using a special certified device, the numerical values of the parameters of electrical energy were obtained; on their basis, the criteria for assessing the indices of power quality and its additional losses due to asymmetric consumption were determined. Based on the methods and software developed by the authors, digital software for calculating asymmetric modes is presented which made it possible to determine a high level of current and voltage asymmetry in the electrical network under study. The obtained results showed that the additional power and energy losses arising due to the asymmetry of the currents increased the level of energy consumption which reduced the efficiency of the use of electrical energy. The digital technology created by the authors made it possible to make calculations confirming the effectiveness of balancing means for which the authors proposed a new type of bal-

ancing device the inclusion of which at a certain point in the electrical network ensured a significant minimization of zero-sequence currents. It is proved that the reduction of zero-sequence flows leads to a significant improvement in the indices characterizing the quality and additional losses of electrical energy. As a methodological basis, the authors use the theory of electrical circuits, a modular method for calculating the indices of current and voltage asymmetry as well as methods of numerical analysis. To visualize the

results of the study, the authors used modern technologies of the MATLAB graphics editor. It has been found that the use of the proposed balancing device at one of the objects of the 0.38 kV electrical networks of the Irkutsk Region makes it possible to increase the efficiency of using electrical energy to a large extent. The research findings may be useful to scientists involved in the study of operating modes of existing electrical networks.

Наумов Игорь Владимирович, д.т.н., профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: professorsnaumov@list.ru.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

Подъячих Сергей Валерьевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ имени А.А. Ежевского, п. Молодежный, Иркутская область, Российская Федерация, e-mail: psv78@yandex.ru.

Третьяков Александр Николаевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ имени А.А. Ежевского, п. Молодежный, Иркутская область, Российская Федерация, e-mail: tretyakov_alex@mail.ru.

Naumov Igor Vladimirovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: professorsnaumov@list.ru.

Bagaev Andrey Alekseevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

Podiachikh Sergey Valerevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Russian Federation, psv78@yandex.ru.

Tretyakov Aleksandr Nikolaevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Russian Federation, e-mail: tretyakov_alex@mail.ru.

Введение

Многочисленные электротехнологические производственные процессы отраслей сельского хозяйства, а также жизнедеятельность сельского населения немислимы без качественного и надежного электроснабжения. На современном этапе развития сельскохозяйственных производственных процессов особо актуальными вопросами являются использование цифровых технологий для обеспечения устойчивого функционирования производственной базы, что в свою очередь, является надежной основой выполнения планируемых показателей в таких отраслях сельскохозяйственного производства, как растениеводство, животноводство и механизация всех производственных процессов. Кроме того, соблюдение нормируемых показателей качества электрической энергии (ЭЭ) в значительной степени позволяет снизить риски от возникновения чрезвычайных ситуаций как в производственной деятельности сельскохозяйственных предприятий, так и в жилых сельских поселениях. При этом совершенствование электроэнергетических процессов в сельском хозяйстве на основе цифровых автоматизированных систем управления может рассматриваться как единая «умная» сеть, являющаяся надежным звеном общей интеллектуальной системы

управления сельскохозяйственными процессами.

В настоящее время в сельском хозяйстве акцент внимания сосредоточен на реализации цифровых технологий в производственные процессы. Развитие этого направления распространяется по всему миру. В рамках ООН заслушан доклад об использовании таких технологий в сельском хозяйстве стран Африки [1]. В частности, в этом докладе говорится о том, что Африка обладает огромными запасами необработанных пахотных земель и значительными людскими ресурсами (более 60% населения моложе 25 лет). В докладе было сказано: «Настоятельно необходимы инвестиции в подключение «последней мили», чтобы укрепить цифровую инфраструктуру в целом и обеспечить разработку инклюзивных стратегий цифрового сельского хозяйства в целях ускорения преобразования сельского хозяйства в Африке» [2]. Территория Российской Федерации огромна и возможностей для освоения пахотных земель ничуть не меньше, чем в странах Африки.

Кафедры электроснабжения и электротехники ИРНТУ и ИрГАУ в течение многих лет занимаются исследованием вопросов качества ЭЭ, последствий нарушения требуемых норм, а также разработкой способов и технических средств, направленных на повышение уровня эффектив-

ности использования электрической энергии в сельском хозяйстве. Многочисленные исследования в этой области позволяют утверждать, что одной из основных причин возникновения рисков в производстве товарной продукции и жизнедеятельности сельского населения является несимметрия фазных токов и напряжений в трехфазной низковольтной электрической сети [3-6].

Итогом такого измененного характера функционирования распределительных электрических сетей служит значительное ухудшение качества электрической энергии, оцениваемое показателями несимметрии напряжений, а также многократное возрастание дополнительных потерь мощности и электрической энергии, оцениваемых показателями несимметрии токов:

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

$$K_R = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \cdot K_R. \quad (2)$$

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

K_{2i} , K_{0i} – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям;

K_R – коэффициент потерь мощности, представляющий собой отношение потерь мощности в несимметричном режиме к соответствующим потерям, обусловленным протеканием только токов прямой последовательности (условно симметричный режим);

$K_R = r_0/r_1$ – коэффициент активного сопротивления ЛЭП;

$r_1 = r_{PH}$ – активное сопротивление прямой последовательности, равное фазному сопротивлению линии электропередачи;

$r_0 = r_{PH} + 3r_N$ – активное сопротивление нулевой последовательности ЛЭП.

При одинаковых сечениях фазного и нулевого проводников их активные сопротивления будут равны. Соответственно, и коэффициент K_R в этом случае будет равен 4.

Еще одним показателем качества, который достаточно чувствителен к изменению токовой нагрузки в фазах при несбалансированном электропотреблении, является установившееся отклонение напряжения электропитания, для которого Стандарт устанавливает соответствующие значения для этого показателя, который определяется по следующим выражениям [7]:

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

$$\delta U_{(+)} = \left[\frac{(U_{m(+)} - U_0)}{U_0} \right] \cdot 100, \quad (3)$$

где $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин. в соответствии с требованиями [7];

U_0 – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению $U_{ном}$ или согласованному напряжению U_c .

При этом в электрических сетях низкого напряжения стандартное номинальное напряжение электропитания равно 220 В (между фазным и нейтральным проводниками для однофазных и четырехпроводных трехфазных систем) и 380 В (между фазными проводниками для трех- и четырехпроводных трехфазных систем).

Многочисленными исследованиями, проведенными кафедрами электроснабжения ИРНИТУ и ИРГАУ в различных регионах России и других странах, показали, что приведенные выше показатели, определяемые по выражениям (1) и (3), достаточно часто превышают значения, установленные Стандартом [8, 9].

В соответствии со сказанным можно утверждать, что систематический мониторинг параметров электрической энергии (ЭЭ), с целью определения критериев, характеризующих несимметрию токов и напряжений, создание инструмента расчета этих критериев, а также разработка способов и методов их минимизации являются одной из важнейших задач при решении вопросов повышения эффективности использования ЭЭ.

Методы, модели и инструменты

Задача создания цифровой технологии расчетов несимметричных режимов включает в себя решение следующих вопросов:

1) на основе существующих методов разработать метод определения параметров симметрирующего устройства;

2) разработка метода определения показателей несимметрии токов и напряжений при включении симметрирующего устройства в исследуемую электрическую сеть;

3) создание программного обеспечения для расчета и визуализации показателей качества и

потерь электрической энергии при отсутствии и включении симметрирующего устройства в исследуемую электрическую сеть.

Представленные вопросы решаются на основании исследований, произведенных профессорами Ф.Д. Косоуховым и И.В. Наумовым [8-12]. В соответствии с методами, изложенными в этих источниках, для определения показателей несимметрии (ПН) токов и напряжений, обусловленных несимметричным электропотреблением, необходимы значения фазных токов: I_A, I_B, I_C , а также значений фазных и междуфазных напряжений: $U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$. Значение этих параметров необходимо фиксировать на протяжении всего периода исследований, в соответствии со Стандартом [13]. Для того чтобы исследования по измерению параметров ЭЭ соответствовали требованиям, необходимо использовать специальные приборы, сертифицированные в Российской Федерации. Таких приборов достаточно много, некоторые из них представлены в [14]. Кроме данных параметров для расчета ПН необходимо знать: параметры линии электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения (10 кВ), параметры силового трансформатора (10/0,4 кВ), а также параметры ЛЭП 0,38 кВ. В качестве средства симметрирования

режима работы исследуемой электрической сети предлагается использовать электромагнитное симметрирующее устройство с саморегулируемой индуктивностью, описанное в [12]. Несомненным преимуществом такого устройства является возможность автоматического изменения параметров симметрирующего устройства (СУ) в функции тока нулевой последовательности, протекающего в исследуемой ЭС. Для определения параметров СУ, соответствующих каждому значению изменяющейся несимметричной нагрузки, на основании законов Кирхгофа составляется система уравнений, в которой учитывается, что коэффициент магнитной связи обмоток, расположенных на одном общем сердечнике, равен 1, а на разных – 1/3 [15]. На рисунке 1 обозначение фаз U, V, W соответствует A, B, C . После преобразований, подробно изложенных в [16], получены значения комплексных сопротивлений прямой (обратной) и нулевой последовательностей электромагнитного СУ:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma 1} = Z_{\Sigma 2} = Z_{\Delta}^3 (Z_f^2)^{-1} &= 2(r + jwL), \\ Z_{\Sigma 0} = Z_{\Delta}^3 (Z_f^2)^{-1} &= 2r \end{aligned} \quad (4)$$



Рис. 1. Электромагнитное симметрирующее устройство с саморегулируемой индуктивностью

Таким образом, входное сопротивление нулевой последовательности СУ определяется только активным сопротивлением устройства. Выразив wL через добротность катушки $g = wL/r$ получим $Z_{\Sigma 1} = 2r\sqrt{1 + g^2}$. Произведя дальнейшие преобразования, учитывая, что добротность электромагнитного устройства находится в пределах 6-8 [17], определим параметры симметрирующего устройства:

$$\begin{aligned} Y_{BD1} = Y_{BD2} &= \frac{1}{(2 \cdot \frac{U_1}{I_1}) * 7.0714}; \\ Y_{BD0} &= 2 * \left(\frac{3 * I_0}{U_0} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные значения параметров симметрирующего устройства учитываются при определении показателей качества и коэффициента потерь, представленных в выражениях (1)-(3). Методика определения всех величин, входящих в эти выражения без СУ и при его включении в электрической сети, подробно рассматривается в [16], на основании которой, с учетом параметров СУ, разработана цифровая оболочка программного комплекса по обеспечению расчетов несимметричных режимов «Unbalance-2» [18].

Результаты исследования и их обсуждение

Для проведения исследований в качестве объекта приняты 2 объекта сельскохозяйствен-

ного назначения. Первым объектом является автозаправочная станция, находящаяся в сельской местности на территории Иркутской области Усольского района, село Белореченское. Второй объект находится в сельских электрических сетях Алтайского края. В рамках данной статьи рассматривается только первый объект. Использование предлагаемой технологии для исследований в сетях второго объекта будет рассмотрено в следующей статье.

Исследования производились на шинах 0,4 кВ силового трансформатора КТП № 3214, 63-10/0,4 кВ в период с 22 февраля по 1 марта 2022 г. (Протокол № 7 от 03.03.2022. Контрольные испытания показателей качества электрической энергии. Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 32144-2013 п.п. 4.2.1-4.2.5). Испытания произведены по заявке ООО «Ангара» (664075 г. Иркутск, ул. Лермонтова). Исследования осуществлялись испытательной лабораторией (ООО «Сибэнком», 664075, г. Иркутск, ул. Байкальская, 239, корпус 26А, а/я 3857, начальник ИЛ Третьяков А.Н.). В качестве инструмента измерений использовался сертифицированный прибор Ресурс-UF2M (год выпуска 2007, зав. № 2347, свидетельство о поверке № С-БП/11-10-2021/101044424 от 11.10.2021 г.). Прибор устанавливался на отходящей от шин ТП ЛЭП, выполненной кабелем АВВГ 4хА50, длиной 60 м. По результатам измерений по программе «Unbalance-2» произведен расчет исследуемых показателей. При этом в качестве исходных данных вводилась информация, соответствующая параметрам исследуемой электрической сети (данные по силовому трансформатору, а также линиям электропередачи высокого и низкого напряжений). По результатам расчетов, с использованием технологий графического редактора MATLAB, получены временные диаграммы изменения исследуемых показателей (рис. 2), откуда видно, что исследуемые показатели на протяжении всего периода измерений имеют случайный характер изменений. При этом несимметрия токов выражена достаточно явно. Среднее за период измерения значение тока в фазе «В» практически вдвое (на 49,3%) меньше, чем в фазе «А», а среднее значение тока в фазе «С» на 17% меньше, чем в фазе «А», и на 40% больше, чем в фазе «В» (рис. 3 а) (здесь и далее при анализе изменения исследуемых показателей будем сравнивать их средние за период измерения (1008 десяти-

нутных интервалов) значения). Соответственно изменению токов происходит и соответствующее изменение коэффициента потерь мощности, среднее значение которого составило 2,997. Это значение говорит о том, что если бы нагрузка во всех трех фазах была совершенно одинакова (условно симметричный режим работы), то потери мощности (соответственно, и энергии) были бы меньше практически в три раза. При этом реальные суммарные потери полной мощности в электрической сети составили в среднем в каждый момент измерения 5,647 кВА. Следует учитывать, что протяженность исследуемой линии электропередачи небольшая – всего 60 м, поэтому потери в электрической сети преимущественно обусловлены потерями в силовом трансформаторе, хотя и он имеет небольшую мощность – 63 кВА, но в данном случае важен сам факт возможности симметрирования режима с помощью симметрирующего устройства, которое может быть применено для любой другой электрической сети. Что касается изменения фазных напряжений, то, как видно из рисунка 2б, различия в изменении фазных напряжений не столь отчетливы, как у токов: средние значения напряжений в фазах «А» и «В» практически одинаковы (расхождение не более 0,3%). Но в фазе «С» уровень напряжения отличен – меньше на 3%, чем в фазах «А» и «В». Тем не менее даже небольшой уровень несимметрии фазных напряжений приводит к существенному изменению отклонения напряжения, среднее значение которого составляет 6,68%.

Стандартом устанавливается значение этого показателя в точке передаче электроэнергии (шины ТП 0,4 кВ) не более $\pm 10\%$ в течение 95% времени интервала измерения в одну неделю. Таких интервалов за период измерения – 1008. В действительности этот показатель соответствует таким требованиям в 85% измерениях. То же самое касается и коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности. Его среднее значение составляет 2,33%.

Таким образом, требование Стандарта нарушается. Значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности во всем интервале измерений соответствует требованиям Стандарта.

Рассмотрим, что происходит с исследуемыми показателями при включении СУ. Многочисленными исследованиями [3-6, 8-12, 16-18] установлено, что наиболее эффективным местом

включения СУ в электрической сети является ближайший к шинам ТП узел нагрузки. В исследуемой электрической сети таким местом следует считать вводно-распределительное устройство АЗС. Произведем расчет исследуе-

мых показателей при включении СУ в этой точке. Временные диаграммы этих показателей при включении СУ на шинах ВРУ представлены на рисунке 3.

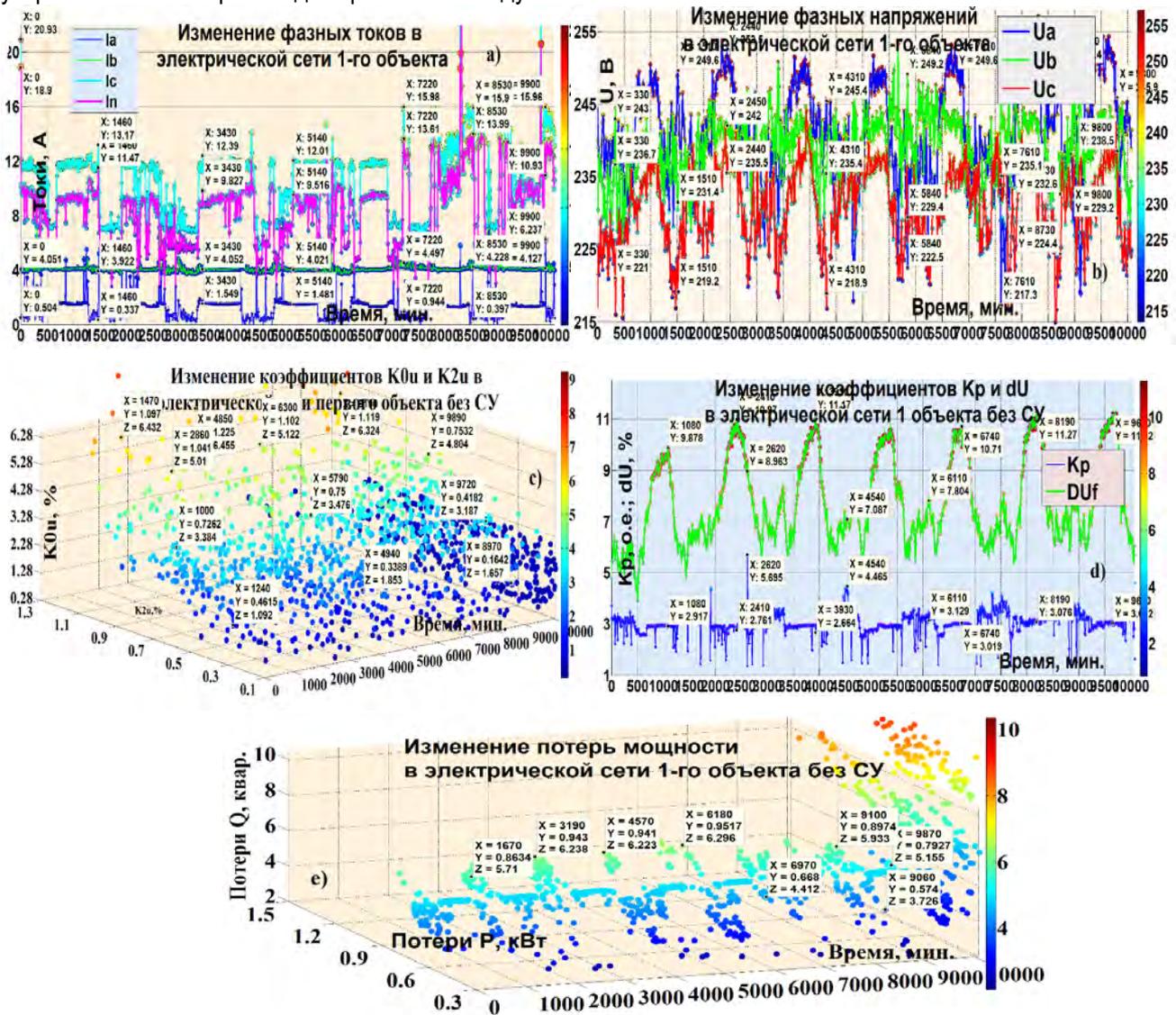


Рис. 2. Временные диаграммы изменения исследуемых показателей в электрической сети 1-го объекта:
 а) токи в фазах; б) фазные напряжения; в) K2u и K0u; д) – Kp и δU ; е) ΔP и ΔQ

Анализ рисунка 4 показывает, что включение СУ позволяет значительно снизить исследуемые показатели. Среднее значение коэффициента K0u составило 0,42% (снижение на 82%); коэффициента Kp – 1,26 (снижение на 58% – в 2,37 раза); коэффициента δU – 1,187 (снижение на 82,2% – в 5,63 раза); суммарные потери составили 2,34 кВт (снижение на 58,6% – в 2,41 раза). Следует отметить тот факт, что снижение потерь и снижение коэффициента потерь практически одинаково – в 2,4 раза. Это свидетельствует о высокой точности расчета и корре-

кции теоретических предпосылок с расчетными данными.

Рассмотрим, каким образом нулевая последовательность влияет на формирование гармонического состава напряжения электропитания (рис. 4). Государственным стандартом [10] устанавливаются следующие значения для гармонических составляющих напряжения, кратных трём для сети 0,38 кВ: для 3-й – 5%, 9-й – 1,5%; 15-й – 0,3%; для 21-й и выше – 0,2%. При этом гармоники могут превышать этих значений не более чем в 5% времени интервала измерения.

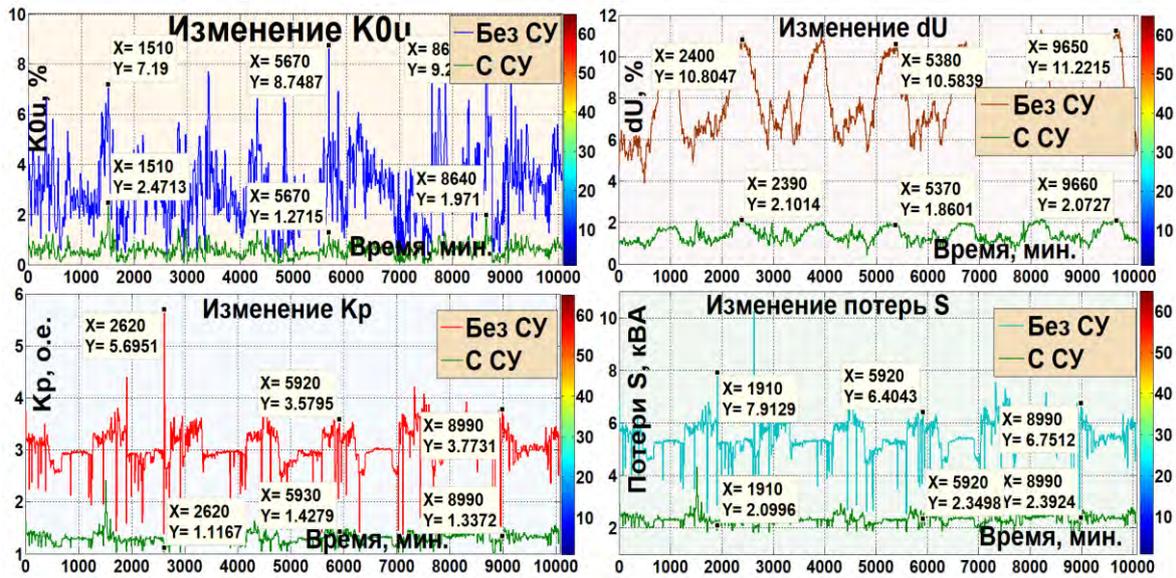


Рис. 3. Временные диаграммы исследуемых показателей в электрической сети 1-го объекта при отсутствии и включении СУ

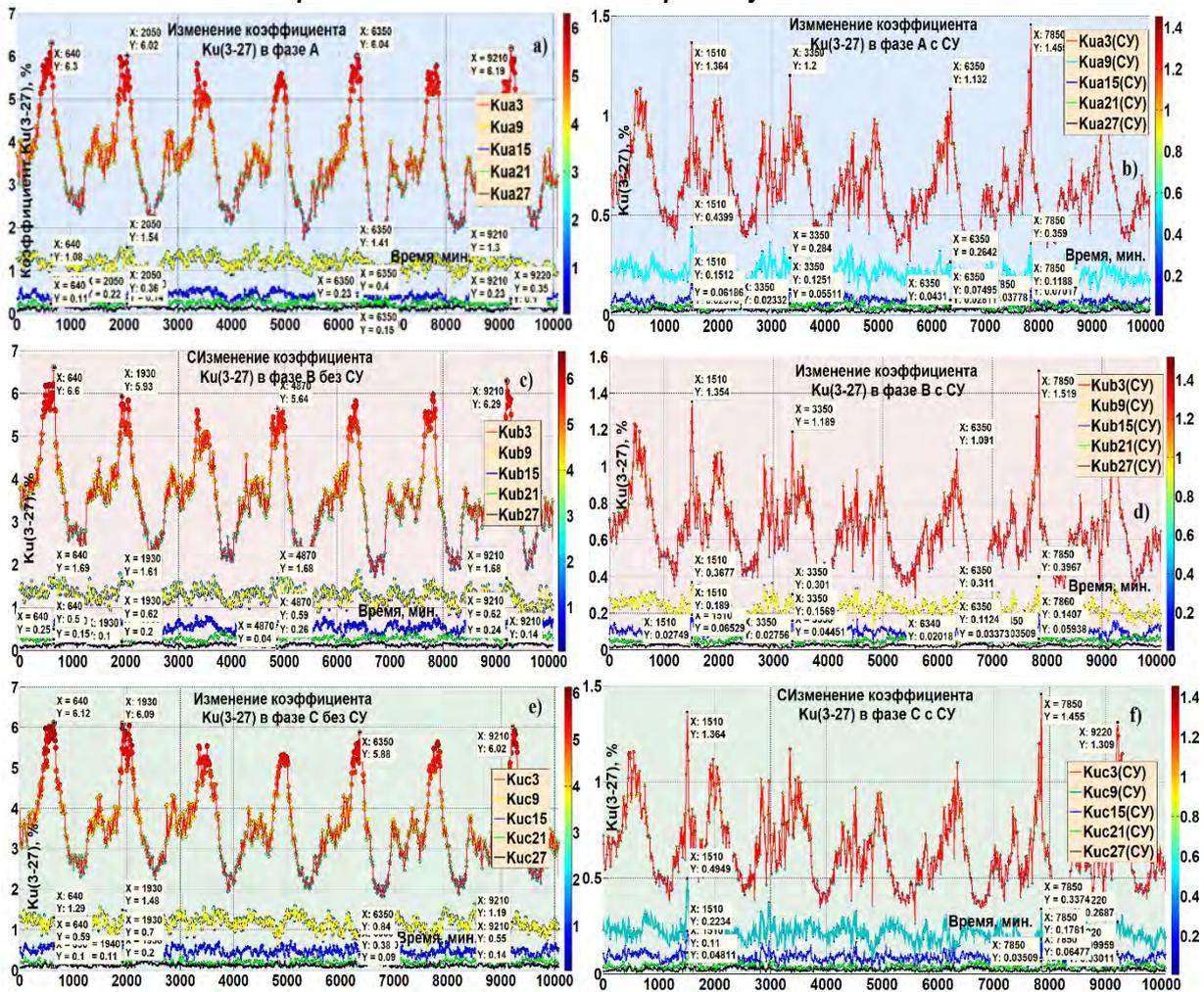


Рис. 4. Временные диаграммы изменения коэффициента гармонических искажений, кратного трём в фазах электрической сети 1-го объекта при отсутствии (а, с, е) и включении (b, d, f) СУ

Анализ рисунка 4 показал, что при отсутствии СУ в электрической сети третья гармоника (U_3) в фазе «А» (рис. 4 а), при ее среднем значении, равном 3,58%, выходит за установленные пре-

делы (5%) в 15% времени установленного десятиминутного интервала. В фазе «В» (рис. 4 с), при среднем значении этой гармоники, равном 3,61, выход за установленное значение наблю-

дается в 15,2% времени измерения; в фазе «С» (рис. 4 е) среднее значение – 3,54, выход за пределы – в 12,4% интервалах измерения. Эффективность симметрирования нулевой последовательности триплен-гармоник представлено на рисунках 4, b, d, f. По девятой гармонике (U_9) среднее значение составило: в фазе «А» – 1,17%, фазе «В» – 1,28%, в фазе «С» – 1,16%. Как видно из диаграмм, выход за установленные пределы по этой гармонике во всех трех фазах находится в допустимых пределах. Это же касается и всех остальных гармоник во всех фазах. Таким образом, выходит за установленные стандартом пределы только 3-я гармоника напряжения.

При включении СУ за счет симметрирования нулевой последовательности, которую несут триплен-гармоники, происходит значительное снижение значений U_3 : во всех трех фазах – на 82%.

Заключение

Уровень несимметричного электропотребления в рассмотренных электрических сетях Иркутской области достаточно высокий. Показатели качества электрической энергии, обусловленные нулевой последовательностью тока, превышают установленные Стандартом значения.

В качестве эффективного средства симметрирования предлагается использование специального шунто-симметрирующего устройства с саморегулируемой индуктивностью, параметры которого определяются автоматически с изменением уровня несимметричного электропотребления. Применение такого устройства значительно повышает эффективность использования электрической энергии.

Библиографический список

1. FAO and ITU. 2022. Status of digital agriculture in 47 sub-Saharan African countries. Rome. – URL: <https://doi.org/10.4060/cb7943en> (дата обращения: 18 мая 2022 г.). – Текст: электронный.
2. Доклад ООН о цифровой революции в сельском хозяйстве Африки: препятствия и возможности. – URL: <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-africa-agriculture-digital-un-report-sub-saharan/ru>. (дата обращения: 8 мая 2022 г.). – Текст: электронный.
3. Naumov I.V., Fedorinova E.S., Yakupova M.N., Tretyakov A.N., Karamov D.N. Power quality and losses in 0.38 kV rural distribution net-

works / EPJ Web of Conferences 217, 01012 (2019) FREPS 2019 <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921701012>. (дата обращения: 8 мая 2022 г.).

4. Naumov I.V., Karamov D., Tretyakov A., Fedorinova E., Yakupova M. (2020). Additional electric loss in rural distribution networks 0.38 kV. *E3S Web of Conferences* 209, 07007. eISSN: 2267-1242 ENERGY-21 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907007> (дата обращения: 8 мая 2022 г.).

5. Naumov, I., Podyachikh, S., Ivanov, D., Tretyakov, A., Bastron, A. (2021). Analysis of unbalanced load low-voltage electrical networks operating modes. *E3S Web of Conferences*. 295. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202129502005.

6. Naumov, I., Podyachikh, S., Ivanov, D., Yakupova, M., Fedorinova, E. (2022). Modeling of Unbalanced Operating Modes in Low-Voltage Distribution Networks. In: Popkova E.G. (eds) Imitation Market Modeling in Digital Economy: Game Theoretic Approaches / 2022) ISC 2020. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 368. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-93244-2_57. (дата обращения: 18 мая 2022 г.).

7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Стандарт качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва: Стандартинформ, 2014. – Текст: непосредственный.

8. Наумов, И. В. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения. Теоретические обобщения: монография / И. В. Наумов. – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2001. – 217 с. – Текст: непосредственный.

9. Косоухов, Ф. Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях: монография / Ф. Д. Косоухов, И. В. Наумов. – Иркутск: Изд-во «ИДП», 2003. – 259 с. – Текст: непосредственный.

10. Косоухов, Ф. Д. Методы расчета и анализа показателей несимметрии токов и напряжений в сельских распределительных сетях: учебное пособие / Ф. Д. Косоухов. – Ленинград: ЛСХИ, 1984. – 42 с. – Текст: непосредственный.

11. Наумов, И. В. Несимметричные режимы работы распределительных электрических сетей: монография / И. В. Наумов. – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2014. – 152 с. – Текст: непосредственный.

12. Наумов, И. В. К вопросу управления несимметричными режимами работы распреде-

лительных электрических сетей 0,38 кВ / И. В. Наумов. – Текст: непосредственный // Промышленная энергетика. – 2022. – № 5. – С. 2-14.

13. ГОСТ 30804.4.30-2013. Межгосударственный стандарт. Методы измерения показателей качества электрической энергии. Дата введения 2014-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104665>. (дата обращения: 10 июня, 2022 г.). – Текст: электронный.

14. Приборы измерения показателей качества электроэнергии (анализаторы и регистраторы). – URL: <https://mirmask.ru/pribory-pokazateley-kachestva-elektroenergii-analizatory-i-registratory> (дата обращения: 10 июня 2022 г.). – Текст: электронный.

15. Расчет индуктивных связей – Моделирование и расчет. – URL: https://bstudy.net/715358/estestvoznaniye/raschet_induktivnyh_svyazey (дата обращения: 11 июня 2022). – Текст: электронный.

16. Наумов, И. В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Наумов Игорь Владимирович. – Санкт-Петербург; Пушкин, 2002. – 387 с. – Текст: непосредственный.

17. Кулагин, С. А. Методы и средства повышения качества электрической энергии в действующих распределительных сетях 0,38 кВ с несимметричной нагрузкой: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кулагин Сергей Анатольевич. – Ленинград: ЛСХИ, 1990. – 190 с. – Текст: непосредственный.

18. Наумов, И. В., Федоринова Э. С., Якупова М. А. «Unbalance-2». Свидетельство о государственной регистрации компьютерной программы № 2022610925. Дата регистрации 18.01.2022. – Текст: непосредственный.

References

1. FAO and ITU. 2022. Status of digital agriculture in 47 sub-Saharan African countries. Rome. [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.4060/cb7943en> (data obrashcheniia: 18 maia 2022 g.).

2. Doklad OON o tsifrovoi revoliutsii v selskom khoziaistve Afriki: prepiatstviia i vozmozhnosti [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-africa-agriculture-digital-un-report-sub-saharan/ru> (data obrashcheniia: 8 maia 2022 g.).

3. Naumov I.V., Fedorinova E.S., Yakupova M.N., Tretyakov A.N., Karamov D.N. Power quality and losses in 0.38 kV rural distribution networks / *EPJ Web of Conferences* 217, 01012 (2019) FREPS 2019 <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921701012> (data obrashcheniia: 8 maia 2022 g.).

4. Naumov I.V., Karamov D., Tretyakov A., Fedorinova E., Yakupova M. (2020). Additional electric loss in rural distribution networks 0.38 kV. *E3S Web of Conferences* 209, 07007. eISSN: 2267-1242 ENERGY-21 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907007> (data obrashcheniia: 8 maia 2022 g.).

5. Naumov, I., Podyachikh, S., Ivanov, D., Tretyakov, A., Bastron, A. (2021). Analysis of unbalanced load low-voltage electrical networks operating modes. *E3S Web of Conferences*. 295. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202129502005.

6. Naumov, I., Podyachikh, S., Ivanov, D., Yakupova, M., Fedorinova, E. (2022). Modeling of Unbalanced Operating Modes in Low-Voltage Distribution Networks. In: Popkova E.G. (eds) Imitation Market Modeling in Digital Economy: Game Theoretic Approaches / 2022) ISC 2020. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 368. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-93244-2_57. (data obrashcheniia: 18 maia 2022 g.).

7. GOST 32144-2013 Elektricheskaiia energiia. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Standart kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia. – Moskva: Standartinform, 2014.

8. Naumov I.V. Optimizatsiia nesimmetrichnykh rezhimov sistemy selskogo elektrosnabzheniia. Teoreticheskie obobshcheniia: monografiia. – Irkutsk, Izd-vo IrGSKhA, 2001. – 217 s.

9. Kosoukhov F.D., Naumov I.V. Nesimmetriia napriazhenii i tokov v selskikh raspredelitelnykh setiakh: monografiia. – Irkutsk, Izd-vo "IDP", 2003. – 259 s.

10. Kosoukhov F.D. Metody rascheta i analiza pokazatelei nesimmetrii tokov i napriazhenii v selskikh raspredelitelnykh setiakh: uchebnoe posobie. – Leningrad: LSKhI, 1984. – 42 s.

11. Naumov I.V. Nesimmetrichnye rezhimy raboty raspredelitelnykh elektricheskikh setei: monografiia. – Irkutsk, IrGSKhA, 2014 – 152 s.

12. Naumov I.V. K voprosu upravleniia nesimmetrichnymi rezhimami raboty raspredelitelnykh

elektricheskikh setei 0,38 kV // Promyshlennaia energetika. – 2022. – No. 5. – S. 2-14.

13. GOST 30804.4.30-2013. Mezhgosudarstvennyi standart. Metody izmereniia pokazatelei kachestva elektricheskoi energii. Data vvedeniia 2014-01-01. [Elektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/1200104665> (data obrashcheniia: 10 iunia 2022 g.).

14. Pribory izmereniia pokazatelei kachestva elektroenergii (analizatory i registratory). [Elektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: <https://mirmsk.ru/pribory-pokazateley-kachestva-elektroenergii-analizatory-i-registratory> (data obrashcheniia: 10 iunia 2022 g.).

15. Raschet induktivnykh svyazei – modelirovanie i raschet. [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa https://bstudy.net/715358/estestvoznание/raschet_induktivnyh_svyazey (data obrashcheniia: 11 iunia 2022 g.).

16. Naumov I.V. Snizhenie poter i povyshenie kachestva elektricheskoi energii v selskikh raspredelitelnykh setiakh 0,38 kV s pomoshchiu simmetririuiushchikh ustroistv / dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhn. nauk. – Sankt-Peterburg; Pushkin, 2002. – 387 s.

17. Kulagin S.A. Metody i sredstva povysheniia kachestva elektricheskoi energii v deistvuiushchikh raspredelitelnykh setiakh 0,38 kV s nesimmetrichnoi nagruzkoi / dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhn. nauk. – Leningrad: LSKhI, 1990. – 190 s.

18. Naumov I.V., Fedorinova E.S., Iakupova M.A. "Unbalance-2". Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii kompiuternoii programmy No. 2022610925. Data registratsii 18.01.2022.



УДК 537.86:331.45
DOI: 10.53083/1996-4277-2022-216-10-81-89

Е.В. Титов, А.В. Крюков, Д.А. Середкин
E.V. Titov, A.V. Kryukov, D.A. Seredkin

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ
К НОРМИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ В СООТВЕТСТВИИ
С РОССИЙСКИМИ И ЕВРОПЕЙСКИМИ НОРМАТИВНЫМИ ДОКУМЕНТАМИ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO NORMING OF ELECTROMAGNETIC FIELD
UNDER PRODUCTION CONDITIONS IN ACCORDANCE WITH THE RUSSIAN
AND EUROPEAN REGULATORY DOCUMENTS**

Ключевые слова: электромагнитное поле, контроль электромагнитной обстановки, предельно допустимый уровень, нормативно-правовое регулирование, международные рекомендации, производственные условия, график распределения ЭМП, годографы напряженностей, проблематика санитарно-гигиенического нормирования.

Keywords: electromagnetic field (EMF), control of electromagnetic environment, maximum permissible level, legal and regulatory framework, international recommendations, production conditions, EMF distribution chart, strength hodographs, problems of sanitary and hygienic norming.