

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.И. Бирюлин¹, Д.В. Куделина²

¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

ORCID¹: 0000-0002-1681-184X, bir1956@mail.ru

ORCID²: 0000-0003-2304-9547, mary_joy@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть вопросы обеспечения качества электроэнергии в системах электроснабжения. Показать, что качество электрической энергии при работе систем электроснабжения в определенных случаях может нарушаться, в том числе и из-за неравномерной нагрузки фаз электрической сети, что приводит к значительной несимметрии напряжений в этой сети. Возникновение большой разницы между напряжениями по фазам электрической сети неизбежно приводит к отрицательным воздействиям на различное электрооборудование как энергоснабжающих организаций, так и на электроприемники потребителей, создавая тем самым условия для возникновения технологического и электромагнитного ущерба, являющихся причинами появления финансовых потерь и других негативных последствий при нарушениях качества электроэнергии. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод математического моделирования системы электроснабжения, реализованный средствами MatLab®. РЕЗУЛЬТАТЫ. Приведены результаты измерений несимметрии напряжения, полученные авторами статьи при мониторинге качества электроэнергии. Данные результаты показывают, что в процессе работы систем электроснабжения возникают режимы, при которых несимметрия напряжений по нулевой последовательности значительно превосходит допустимые значения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Показано на компьютерной модели простейшей системы электроснабжения, что снижение сопротивления нулевого проводника может служить довольно эффективным мероприятием по снижению несимметрии напряжений, особенно при преобладании индуктивной нагрузки в составе потребителей.

Ключевые слова: качество, электроэнергия, несимметрия, обратная последовательность, нулевая последовательность, компьютерное моделирование

Благодарности: Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-5109.2022.4 "Разработка автоматизированной системы выявления объектов, оказывающих негативное влияние на качество электроэнергии".

Для цитирования: Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Разработка модели для анализа способов снижения несимметрии напряжений в системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 72-85. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86.

MODEL DEVELOPMENT FOR THE ANALYSIS OF REDUCING VOLTAGE ASYMMETRY METHODS IN POWER SUPPLY SYSTEMS

VI. Biryulin¹, DV. Kudelina²

¹Southwest State University, Kursk, Russia

²Southwest State University, Kursk, Russia

ORCID¹: 0000-0002-1681-184X, bir1956@mail.ru

ORCID²: 0000-0003-2304-9547, mary_joy@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. To consider the issues of ensuring the quality of electricity in power supply systems. Show that the quality of electrical energy during the operation of power supply systems in certain cases may be violated, including due to uneven loading of the electrical network phases, which leads to significant voltage asymmetry in this network. The occurrence of a large difference between the voltages in the phases of the electrical network inevitably leads to negative impacts on various electrical equipment of both power supply organizations and consumer electrical receivers, thereby creating conditions for the occurrence of technological and electromagnetic damage, which are the causes of financial losses and other negative

consequences in case of quality violations electricity. METHODS. When solving the problem, we used the method of the power supply system mathematical modeling, implemented by means of MatLab®. RESULTS. The article presents the results of voltage asymmetry measurements obtained by the authors while monitoring the quality of electricity. These results show that during the operation of power supply systems, modes arise in which the voltage asymmetry in the zero sequence significantly exceeds the permissible values. CONCLUSION. The article shows on a computer model of the simplest power supply system that reducing the resistance of the neutral conductor can serve as a fairly effective measure to reduce voltage unbalance, especially when inductive loads predominate among consumers.

Keywords: *quality, electricity, asymmetry, negative sequence, zero sequence, computer simulation*

Acknowledgments: *The publication was carried out with the Russian Federation President Grant financial support for young scientists state support - Candidates of Science, project No. MK-5109.2022.4 "An automated system development for identifying objects which have a negative impact on power quality".*

For citation: Biryulin VI, Kudelina DV. Model development for the analysis of reducing voltage asymmetry methods in power supply systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):72-85. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86.

Введение

В современном обществе к товарной продукции относятся не только товары, выпускаемые на соответствующем производстве в виде материальных объектов, но и электроэнергия. Одним из важнейших свойств любого вида товарной продукции, в том числе и электрической энергии, является качество, от которого во многом зависит привлекательность того или иного товара для потребителей. Качество каждого товара определяется некоторой совокупностью количественных показателей, определяющих определенные характеристики данного товара.

Для электрической энергии качество устанавливается в виде степени соответствия характеристик электроэнергии установленным или же нормативным значениям, представляющим собой показатели качества электрической энергии [1, 2].

Сети низкого, среднего и высокого напряжения входят в состав систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц, предназначенных для обеспечения потребителей электроэнергией. Точки передачи электроэнергии чаще всего разделяют электрические сети энергоснабжающих организаций и электрические сети потребителей электроэнергии. Положение этих точек устанавливается в ходе заключения договоров на электроснабжение или же при выполнении процесса технологического присоединения электросетей потребителей к электросетям поставщиков электрической энергии.

Но при анализе различных вопросов, связанных с качеством электрической энергии следует принимать во внимание, что электроэнергия по своим свойствам во многом отличается от материальных товаров. Во многом это связано с тем, что процессы производства, передачи и потребления электроэнергии неразрывны во времени. Также следует учитывать, что качество электрической энергии создается не только производителями и поставщиками электроэнергии, но также и ее потребителями [3–8].

Научная значимость статьи заключается в выявлении зависимостей между сопротивлением нулевого проводника в трехфазной четырехпроводной электрической сети и значениями фазных напряжений при неравномерной нагрузке в фазах и различном характере этой нагрузки. Результаты исследований показывают, что снижение сопротивления нулевого проводника позволяет снизить несимметрию напряжений, и это мероприятие будет наиболее эффективным при преимущественно индуктивном характере нагрузки.

Практическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования могут использоваться при разработке мероприятий по повышению качества электроэнергии. На базе полученных результатов легко оценивать эффективность снижения сопротивления нулевого проводника в ходе планирования мер для повышения качества электрической энергии, в частности, снижения несимметрии напряжений в трехфазной электрической сети с нулевым проводником.

Литературный обзор

К точке передачи электроэнергии в общем случае присоединяются несколько электрических сетей. При работе этих сетей происходит воздействие на качество электрической энергии, приводящее к ее снижению в той или иной мере. Но при этом влияние каждого из присоединений, как потребителей, так и поставщиков на процессы

снижения качества электроэнергии в подавляющем большинстве рассматриваемых случаев будет различным [3]. Если же несмотря на эти процессы, качество электроэнергии будет соответствовать установленным требованиям, то очевидно, что в этом случае нет необходимости в проведении дополнительных исследований или же мониторинга качества для определения степени влияния того или иного присоединения на качество электроэнергии [8].

Выход показателей качества электроэнергии за установленные границы неизбежно приводит к появлению негативных последствий. Эти последствия воздействуют как на различное электрооборудование энергоснабжающих организаций, так и на электроустановки и электроприемники потребителей электроэнергии. Это приводит к возникновению ущерба, разделяющегося на технологический и электромагнитный, который неизбежно приводит к появлению более или менее значительных финансовых потерь [7–16].

В настоящее время установлены показатели качества электроэнергии, определяющие характеристики сетевого напряжения, относящиеся к частоте, значениям и форме напряжения электрической сети, для трехфазной сети дополнительно рассматривается симметрия напряжений. Все указанные характеристики напряжения в течение времени непрерывно изменяются в той или иной степени.

Несмотря на постоянное развитие электроэнергетики, проблема поддержания надлежащего качества электрической энергии сохраняет свою актуальность в настоящее время, не только в нашей стране, но и в остальном мире. Известные из литературы исследования вопросов и проблем в области качества электроэнергии посвящены различным сторонам этой проблемы и изучают сложившееся положение в данной области без рассмотрения путей и способов повышения качества электроэнергии. В работе Коверниковой Л.И., Тульского В.Н., Шамонова Р.Н. [1] исследовались проблемы качества электроэнергии на уровне единой энергетической системы России. В работе Деда А. В., Сикорского С. П., Смирнова П. С. [2] показаны итоги измерений показателей качества электроэнергии в различных системах электроснабжения. В работе Харитонов Я.С., Бебихова Ю.В., Егорова А.Н. [4] анализируются результаты контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий. Работы Черепанова А.В., Тихомирова В.А., Куцего А.П. [9], Kleshchov A., Hugi C., Terentiev O. [11], Суворова И.Ф., Романова В.В., Хромова С.В. [18], Rozhkov V.V., Krutikov K.K., Trofimenko S.R. [23], Khatsevskiy K.V., Antonov A.I., Gonenko T.V. [25] посвящены исследованиям влияния несимметрии напряжений на работу электрических сетей и электроприемников. В работе Nenad A.M., Slobodan N.B., Jeroslav M.Ž. [26] исследовались вопросы поддержания качества электроэнергии в допустимых пределах с помощью пассивных LC фильтров.

Таким образом, в известной научной литературе вопросы повышения качества электроэнергии при несимметрии в электрической сети путем изменения параметров проводников сети изучены недостаточно глубоко. Научное значение результатов данного исследования заключается в обнаружении зависимостей между несимметрией напряжений в трехфазной электрической сети и сопротивлением нулевого проводника при различном характере нагрузки.

Также актуальность вопросов качества электроэнергии подтверждается большим количеством исследований, опубликованных в других источниках - [3, 5–8, 10, 12 – 17, 19 – 22, 24], как по общей проблеме качества электрической энергии, так и по отдельным сторонам этой проблемы, связанным с нарушением качества по некоторым отдельным показателям.

Материалы и методы

Рассмотрим более подробно негативные последствия нарушения симметрии напряжений в трехфазной электрической сети. Появление значительной несимметрии напряжений неблагоприятно сказывается на работу электрооборудования и электроприемников.

Авторами статьи выполнен большой объем работ по мониторингу качества электрической энергии, и на основе его результатов можно сделать обоснованный вывод, что нарушение установленных значений коэффициентов несимметрии напряжений происходит практически только для нулевой последовательности. Для подтверждения этого вывода приведем примеры результатов измерения показателей несимметрии напряжений, полученных авторами статьи при проведении мониторинга качества электроэнергии на двух энергетических объектах - суточные графики измерений фазных напряжений, коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, показанные на рис.1–3, 5–7. Эти измерения выполнялись в трехфазной электрической сети с нулевым проводом.

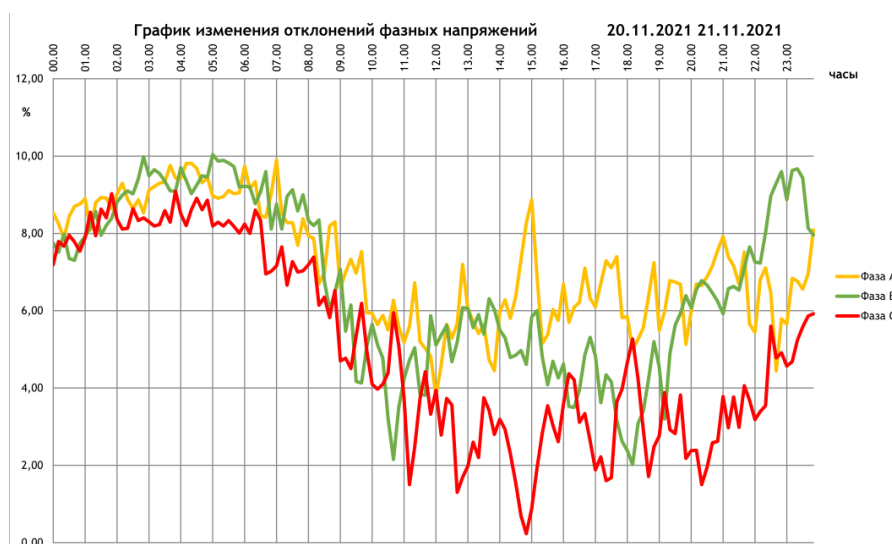


Рис. 1. Суточный график изменения фазных напряжений на первом энергетическом объекте

Fig. 1. Daily graph of phase voltage changes at the first power facility

Даже при кратком анализе данного графика видно, что имеются интервалы времени, в которых возникают значительные различия между напряжениями фаз. Эти различия служат причиной появления недопустимых значений напряжения нулевой последовательности, что проявляется в превышении установленных значений для коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности – рис.3, которое не должно быть больше 4% за весь период проведения измерений, а также не более 2% за 95% периода измерений.

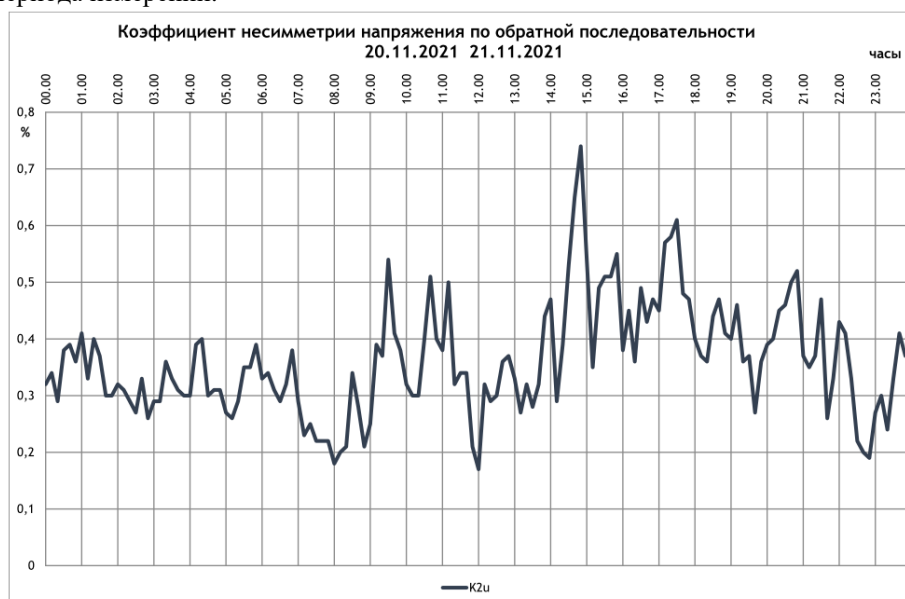


Рис. 2. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на первом энергетическом объекте

Fig. 2. Daily graph of the change in the voltage asymmetry coefficient in reverse order at the first power facility



Рис. 3. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности на первом энергетическом объекте

Fig. 3. Daily graph of the change in the voltage asymmetry coefficient in the zero sequence at the first power facility

Приведем в табл.1 значения коэффициента несимметрии, измеренные при проведении энергетических обследований.

Таблица 1

Значения коэффициента несимметрии напряжений на первом энергетическом объекте

Период	Результат измерений	Нормативное значение	T ₁ ,%	T ₂ ,%
95%	3,19	2,00	34,27	-
100%	4,75	4,00	-	1,40

Как видно из этой таблицы нормативные значения как за весь период измерений, так и за 95% длительности этого периода оказались превышенными. Причина появления такого нарушения качества электрической энергии – неравномерная нагрузка фаз и как следствие этого резкое отличие напряжений по фазам электрической сети. Для иллюстрации тесной связи значительной разности напряжений по фазам и недопустимо больших величин коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности приведем суточный график изменения разности между максимальным и минимальным значениями фазных напряжений на первом энергетическом объекте – рис.4.

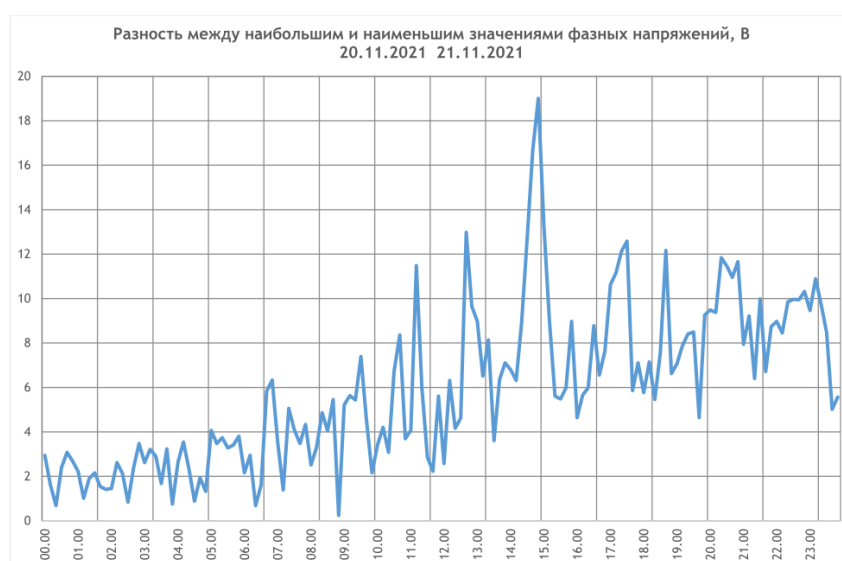


Рис. 4. Суточный график изменения разности между максимальным и минимальным значениями фазных напряжений

Fig. 4. Daily graph of the change in the difference between the maximum and minimum values of phase voltages

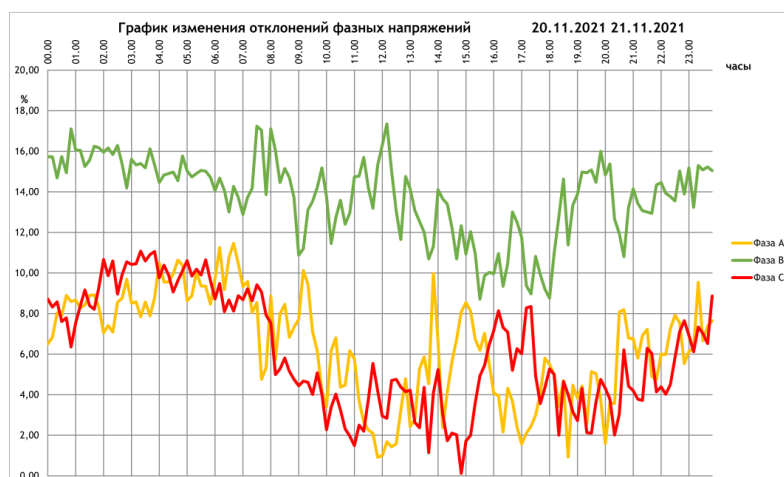


Рис. 5. Суточный график изменения фазных напряжений на втором энергетическом объекте

Fig. 5. Daily graph of phase voltage changes at the second power facility



Рис. 6. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на втором энергетическом объекте

Fig. 6. Daily graph of the change in the voltage asymmetry coefficient in reverse order at the second power facility



Рис. 7. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности на втором энергетическом объекте

Fig. 7. Daily graph of the change in the coefficient of asymmetry of voltages in the zero sequence at the second power facility

На втором энергетическом объекте различия фазных напряжений оказались еще больше, и максимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой

последовательности превышает предельно допустимое значение более чем в два раза. Это подтверждается данными, приведенными в табл.2.

Таблица 2

Значения коэффициента несимметрии напряжений на втором энергетическом объекте				
Период	Результат измерений	Нормативное значение	T ₁ ,%	T ₂ ,%
95%	7,59	2,00	100,0	-
100%	9,44	4,00	-	67,83

Далее приведем суточный график изменения разности между максимальным и минимальным значениями фазных напряжений на втором энергетическом объекте – рис.8.

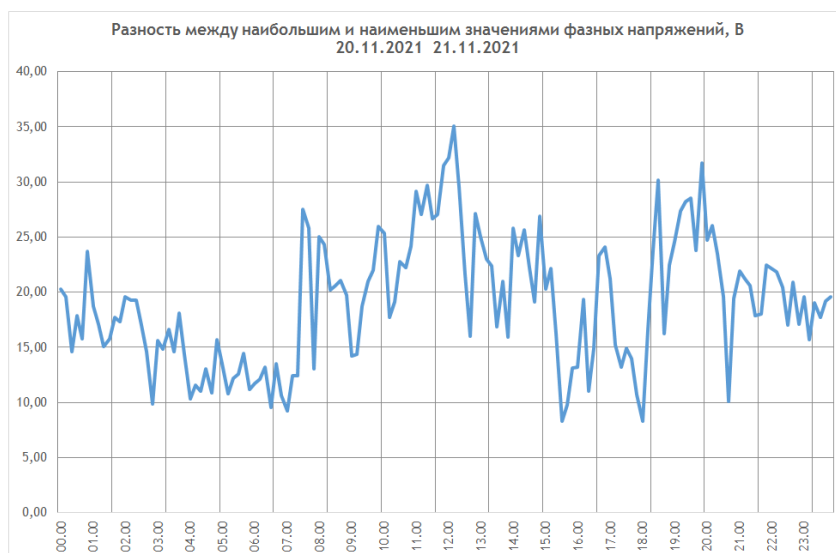


Рис. 8. Суточный график изменения разности между максимальным и минимальным значениями фазных напряжений

Fig. 8. Daily graph of the change in the difference between the maximum and minimum values of phase voltages

Как видно из приведенных выше графиков, напряжения обратной последовательности в обоих случаях не достигают больших значений, и величина коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности намного меньше коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности и не превышает предельно допустимого значения. Также следует обратить внимание на тот факт, что графики изменения разностей между максимальным и минимальным значениями напряжений по своей форме практически полностью повторяют графики изменения коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

Появление в трехфазной сети значительной разницы напряжений неблагоприятно сказывается на режимах работы электроприемников. Кроме того, в системе электроснабжения появляются дополнительные потери электроэнергии.

Поэтому для снижения несимметрии напряжений в трехфазной электрической сети на сегодняшний день предлагается несколько технических решений, наиболее эффективными из них считаются [29-31]:

- применение силовых трансформаторов с встроенными в них устройствами для симметрирования фазных напряжений;
- установка в электрических сетях специальных устройств для симметрирования напряжения.

Применение этих мероприятий требует вложения достаточно больших денежных сумм, поэтому необходимо рассматривать при выборе мер по снижению несимметрии в электрических сетях и более простые методы, не требующих привлечения значительных финансовых ресурсов.

Рассмотрим в качестве такого мероприятия изменение сопротивления нулевого проводника в четырехпроводной трехфазной электрической сети, схема которой приведена на рис.9.

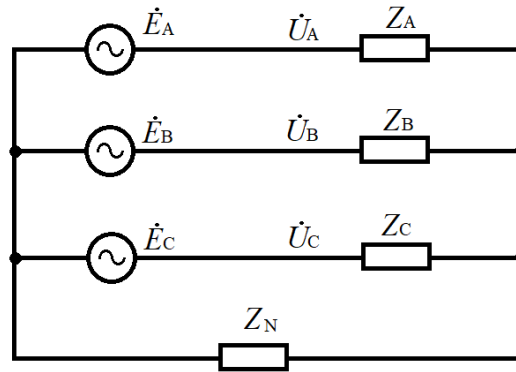


Рис. 9. Схема исследуемой электрической сети

Fig.9. Scheme of the investigated electrical network

В этой схеме источник питания представлен тремя фазными ЭДС - \dot{E}_A , \dot{E}_B , \dot{E}_C . Нагрузка – тремя сопротивлениями Z_A , Z_B и Z_C соответственно. Напряжения на нагрузке - \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C . Сопротивление нулевого проводника - Z_N .

По известным методам теоретической электротехники напряжение смещения нейтрали \dot{U}_N определяется в общем случае как:

$$\dot{U}_N = \frac{Y_A \cdot \dot{E}_A + Y_B \cdot \dot{E}_B + Y_C \cdot \dot{E}_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}, \quad (1)$$

где Y_A , Y_B , Y_C , Y_N – проводимости фазных нагрузок и нулевого провода, определяемые соответственно как:

$$Y_A = \frac{1}{Z_A}, Y_B = \frac{1}{Z_B}, Y_C = \frac{1}{Z_C}, Y_N = \frac{1}{Z_N}. \quad (2)$$

Напряжение на каждой фазе, например, фазе А, можно определить при конечном сопротивлении и проводимости нулевого проводника как:

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{U}_N. \quad (3)$$

Если предположить, что сопротивление нулевого проводника равняется нулю, то в этом случае:

$$\dot{U}_N = \dot{I}_N \cdot Z_N = 0. \quad (4)$$

Согласно формул (3) и (4) при уменьшении сопротивления нулевого проводника можно снизить величину несимметрии напряжения. Это достигается увеличением сечения данного проводника. Такое мероприятие достаточно просто реализовать по сравнению с заменой силовых трансформаторов на трансформаторных подстанциях или же установкой симметрирующих устройств, нуждающихся в устройствах регулирования, так как при изменении нагрузок необходимо управление параметрами данного устройства.

Проведем исследование эффективности предлагаемого способа на компьютерной модели. Считаем, что некоторая трехфазная нагрузка подключена к источнику питания, имеющему намного большую мощность, четырехжильным кабелем с медными жилами сечением 35 мм² и длиной 100 метров. При моделировании учитываем только активные сопротивления жил, так как индуктивные сопротивления кабелей в несколько раз меньше активных.

Проведем исследование приведенной выше схемы на компьютерной модели, созданной в пакете расширения Simulink компьютерной системы научно-технических расчетов MatLab. Сама модель представлена на рис.10.

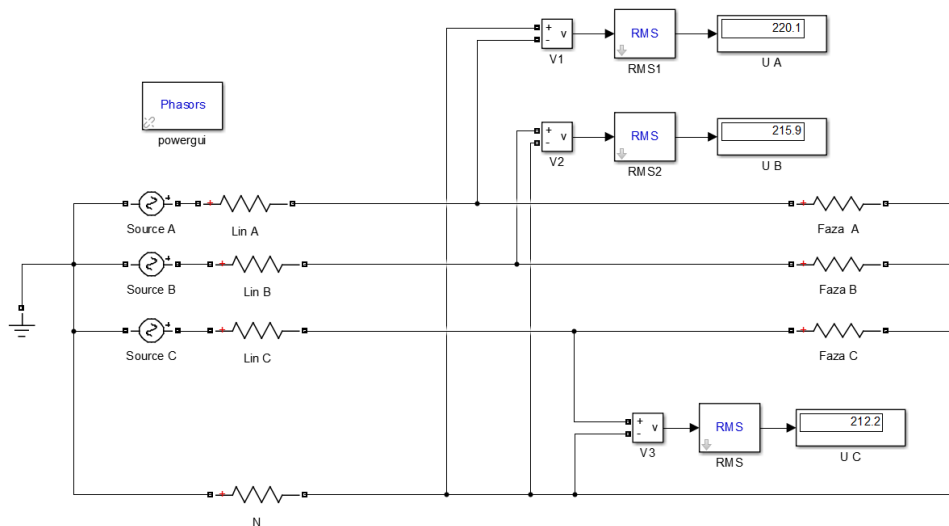


Рис. 10. Компьютерная модель исследуемой схемы

Fig.10. Computer model of the circuit under study

Элементы модели Source A, Source B, Source C представляют трехфазный источник питания с номинальным фазным напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Четырехжильный кабель сечением 35 мм² введен в модель активными сопротивлениями – элементами Lin A, Lin B, Lin C (фазные токопроводящие жилы) и N (нулевой провод). Значения сопротивлений элементов Lin A, Lin B, Lin C не изменяются при проведении процессов моделирования и равны 0,05 Ом (сопротивление жилы кабеля сечением 35 мм² и длиной 100 метров), сопротивление элемента N при работе модели будет изменяться от начального значения 0,05 Ом в меньшую сторону.

Элементы Faza A, Faza B, Faza C представляют трехфазную нагрузку. Эта нагрузка сначала принимается чисто активной и неравномерной по фазам, затем активно-индуктивной с равенством активной и индуктивной составляющей, после активно-индуктивной с преобладанием активной и индуктивной составляющей. Напряжение на нагрузке контролируется вольтметрами V1, V2, V3 с преобразованием мгновенных значений блоками RMS в действующие и выводом результатов измерений на дисплеи U A, U B, U C.

Для первого опыта были установлены следующие параметры нагрузки:

- фаза A: 10 кВт;
- фаза B: 18 кВт;
- фаза C: 25 кВт.

В первом опыте сопротивление нулевого проводника изменялось от начального значения 0,05 Ом (отношение сопротивления фазного проводника линии R_{lin} к сопротивлению нулевого проводника R_n равняется единице) до значения 0,005 Ом (отношение сопротивления фазного проводника линии R_{lin} к сопротивлению нулевого проводника R_n равняется десяти). Затем для каждого полученного значения рассчитывались разности напряжений между максимальным U_{max} и минимальным U_{min} значениями фазных напряжений в вольтах ΔU и процентах $\Delta U\%$:

$$U_{max} - U_{min} \quad (5)$$

$$\Delta U\% = \Delta U \cdot 100 / 220, \quad (6)$$

где 220 – значение номинального фазного напряжения.

Результаты

Результаты, полученные при работе компьютерной модели с активной нагрузкой фаз и проведении расчетов по формулам (5) и (6), приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты моделирования при активной нагрузке

R _{lin} /R _n	U A, В	U B, В	U C, В	ΔU , В	$\Delta U\%$
1	220,1	215,9	212,2	7,9	3,6
2	219,0	215,9	213,3	5,7	2,6
3	218,6	215,9	213,7	4,9	2,2
4	218,4	216,0	213,9	4,5	2,0
5	218,2	216,0	214,0	4,2	1,9

6	218,2	216,0	214,1	4,1	1,9
10	218	216	214,2	3,8	1,7

Для второго опыта к активной нагрузке добавлялась индуктивная по величине равная активной. Результаты, полученные при работе компьютерной модели со смешанной нагрузкой фаз (равенство активной и реактивной нагрузки) и проведении расчетов по формулам (5) и (6), приведены в табл.4.

Таблица 4

Результаты модерирования при равной активно-индуктивной нагрузке

Rlin/Rn	U A, B	U B, B	U C, B	ΔU , B	$\Delta U\%$
1	221,4	213,4	213,3	8,1	3,7
2	219,6	214,6	213,9	5,7	2,6
3	219	215	214	5,0	2,3
4	218,7	215,3	214,1	4,6	2,1

В третьем опыте мощность активной нагрузки была снижена до значения 0,3 от величины индуктивной нагрузки. Результаты, полученные при работе компьютерной модели со смешанной нагрузкой фаз (равенство активной и реактивной нагрузки) и проведении расчетов по формулам (5) и (6), приведены в табл.5.

Таблица 5

Результаты модерирования при активно-индуктивной нагрузке с преобладанием индуктивной

Rlin/Rn	U A, B	U B, B	U C, B	ΔU , B	$\Delta U\%$
1	221,7	215,7	218,9	6,0	2,7
2	220,5	217,1	218,6	3,4	1,5
3	220,1	217,6	218,5	2,5	1,1
4	219,9	217,9	218,4	2,0	0,9

Обсуждение

Проведем анализ полученных данных. При чисто активной нагрузке и при равной активно-индуктивной нагрузке снижение сопротивления нулевого провода в созданной компьютерной модели приводило к уменьшению неравномерности напряжений по фазам относительно медленно – от 3,6% до 2,0%, уменьшение сопротивления нулевого провода при этом происходило в четыре раза. При равной активно-индуктивной нагрузке снижение несимметрии напряжений происходило примерно в таких же пределах.

В случае преобладания индуктивной нагрузки снижение сопротивления нулевого проводника обеспечивало более быстрое уменьшение несимметрии напряжений. При изменении сопротивления нулевого проводника в четыре раза происходило снижение разности фазных напряжений от 2,7% до 0,9%. Поэтому такое мероприятие для снижения несимметрии напряжений в трехфазной электрической сети как уменьшение сопротивления нулевого проводника или увеличение его сечения целесообразно использовать в случаях, если нагрузка имеет преимущественно индуктивный характер.

Заключение

Цель, поставленная в данной статье, достигнута. Выполнено исследование на компьютерной модели, разработанной авторами, мероприятия по повышению качества электрической энергии при появлении несимметрии в электрической сети, состоящее в снижении сопротивления нулевого проводника при различном характере нагрузке сети – как чисто активном, так и смешанном (активно-индуктивном).

Приведенные результаты компьютерного моделирования режимов работы простейшей системы электроснабжения показывают возможность использования изменения сопротивления нулевого провода в трехфазной четырехпроводной электрической сети для снижения неравномерности напряжений по фазам этой сети, что приводит к уменьшению напряжения нулевой последовательности и в конечном итоге такого показателя качества электрической энергии как коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности. Также в ходе моделирования получены результаты, свидетельствующие о том, что данное мероприятие имеет более высокую эффективность при преобладании индуктивной нагрузки в составе потребителей электрической энергии.

Литература

1. Коверникова Л.И., Суднова В.В., Шамонов Р.Г. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.

2. Дед А.В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 60–64. doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.
3. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Грачева Е.И. и др. Моделирование спектров высших гармоник в системах электроснабжения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10. №3/4. С. 136-150.
4. Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Егоров А.Н. Сопоставление и анализ результатов контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 4. С. 54-59. doi: 10.17513/mjprfi.12697
5. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Ларин О.М. Выявление источника фликера в системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. №5. С. 3-12.
6. Антонов А.И., Денчик Ю.М., Зубанов Д.А., и др. Моделирование несимметричных режимов работы электрической сети и обработка результатов с помощью программы для ЭВМ // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 48–54. doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-48-54.
7. Руди Д.Ю. Проблема качества электроэнергии судовых электроэнергетических систем // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 40–43. doi: 10.25206/1813-8225-2018-159-40-43.
8. Дворкин Д.В., Силаев М.А., Тульский В.Н. и др. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии // Электричество. 2017. № 7. С. 12–19. doi: 10.24160/0013-5380-2017-7-12-19.
9. Черепанов А.В., Тихомиров В.А., Куций А.П. Влияние несимметрии напряжений на энергоэффективность // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. №4 (56). С.207-217. doi: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).207-217.
10. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Применение системы нечеткого вывода для оценки состояния изоляции кабельных линий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. №1 (49). С. 191-203.
11. Kleshchov A., Hugi C., Terentiev O. et al. Voltage asymmetry influence on resource consumption at power generating plants // Journal of Urban and Environmental Engineering. 2019. Vol. 13. pp. 219-227. doi: 10.4090/juee.2019.v13n2.219227.
12. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Polishchuk S.Y. Current filtering in a three-phase three-wire power system at asymmetric sinusoidal voltages // Electrical engineering & electromechanics. 2018, N2. pp. 63-68. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.11.
13. Vamvakari A., Kandianis A., Kladas A., et al. Analysis of supply voltage distortion effects on induction motor operation // IEEE Transactions on Energy Conversion: 2001. Vol. 16, N3. pp. 209-213. doi: 10.1109/60.937198.
14. Yalisho G. L. Investigation & Minimization of Loss in Distribution System // American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2016. Vol. 5, N5. pp. 45-50. doi: 10.11648/j.epe.20160505.11
15. Allaev K. R., Musinova G. F. Analysis of power losses in phases in distribution networks at load imbalance // Universum. 2020. N6(75). pp. 65-70. doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.75
16. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Modeling cable lines heating by currents of higher harmonics and interharmonics. ICIEAM 2019: Proceedings of the International conference on industrial engineering, applications and manufacturing; 25-29 March 2019; Sochi, Russia: IEEE. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743089
17. Bellan D. Approximate circuit representation of voltage unbalance emission due to load asymmetry in three-phase power systems conference. GEMCCON 2018: Proceedings of the 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference; 7-9 Nov 2018; Stellenbosch, South Africa: IEEE; 2018. doi: 10.1109/GEMCCON.2018.8628545
18. Суворов И.Ф., Романова В.В., Хромов С.В. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2016. №3. С. 72-83. doi: 10.14529/power160309
19. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Анализ нагрева кабельных линий токами высших гармоник и интергармоник // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. №2 (46). С. 61-67.
20. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутризаводского электроснабжения

// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 93–104. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-93-104.

21. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Larin O.M. Simulation of negative sequence voltage source determination in power supply systems. FarEastCon 2020: Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies; 6-9 Oct. 2020; Vladivostok, Russia: IEEE. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271409.

22. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Larin O.M. Asymmetry occurrence modeling in electrical supply systems. FarEastCon 2020: Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies; 6-9 Oct. 2020; Vladivostok, Russia: IEEE. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271179

23. Rozhkov V.V., Krutikov K.K., Trofimenko S.R. Analysis of Operation Features for the Auxiliary Transformers at Power Plants in Non-Symmetric Modes. ICIEAM 2021: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing; 7-21 May 2021; Sochi, Russia: IEEE; pp. 169-174. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446295.

24. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т.23. №3. С. 209-222. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222

25. Khatsevskiy K.V., Antonov A.I., Gonenko T.V. et al. The voltage asymmetry in electrical networks with single-phase load. Dynamics 2017: Proceedings of the Dynamics of systems, mechanisms and machines, 14-16 Nov. 2017; Omsk, Russia: IEEE; pp. 1-4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239461.

26. Nenad A.M., Slobodan N.B., Jeroslav M.Ž. Application of Passive CL Filters for Neutralizing of Zero Sequence Currents and Correction of Asymmetries of Phase Voltages in Electrical Networks // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2017. Vol.9, N5. pp. 10-18. doi: 10.5815/ijisa.2017.05.02

27. Ciontea C.I., Iov F. A power study of load imbalance influence on quality assessment for distribution networks // Electricity. 2021, N2. pp. 77–90. doi: 10.3390/electricity2010005

28. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Simulation of the Higher Harmonics Source Determination in Power Supply Systems. ICIEAM 2021: Proceedings of the International conference on industrial engineering, applications and manufacturing; 17-21 May 2021; Sochi, Russia: IEEE. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446458

29. Naumov I., Podyachikh S., Ivanov D. Efficiency of the balancing devices to power quality improve. SAHD 2021: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference “Modern Science: Problems and Development Prospects (Social and Humanitarian Directions)”; 26 April 2021. doi: 10.1051/shsconf/202110102012

30. Руди Д.Ю., Антонов А.И., Гоненко Т.В. и др. Методы снижения несимметрии напряжения в электрических сетях 0,4-10 кВ // ОНВ. 2018. №2 (158). doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-75-78

31. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 85-92. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92

Авторы публикации

Бирюлин Владимир Иванович - канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Юго-Западного государственного университета.

Куделина Дарья Васильевна - канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Юго-Западного государственного университета

References

1. Kovernikova LI, Sudnova VV, Shamonov RG. *Kachestvo elektricheskoy energii: sovremennoe sostoyanie, problemy i predlozheniya po ih resheniyu*. Novosibirsk. Nauka; 2017. (in Russ.)

2. Ded AV, Sikorskiy SP, Smirnov PS. Results of measurements of power quality indicators in power supply systems of enterprises and organizations. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018; 2 (158):60–64. (in Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.

3. Biryulin VI, Kudelina DV, Gracheva EI et al. Modeling the spectra of higher harmonics in power supply systems. *Bulletin of the Southwest State University. Series: Management, computer technology, informatics. Medical instrumentation*. 2020; 10 (3/4): 136-150. (in Russ.)

4. Kharitonov YaS, Bebikhov YuV, Egorov AN. Comparison and analysis of the results of power quality control in power supply systems of mining enterprises. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019; 4: 54-59. doi:10.17513/mjpf.12697 (in Russ.)

5. Biryulin VI, Kudelina DV, Larin OM. Identification of the source of flicker in power supply systems. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(5): 3-12. (in Russ.)
6. Antonov AI, Denchik YuM, Zubanov DA et al. Simulation of asymmetric modes of operation of an electrical network and processing of results using a computer program. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018; 2 (158): 48–54. (in Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-48-54.
7. Rudy DYU. The problem of power quality of ship power systems. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018; 3 (159): 40–43. (in Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-159-40-43.
8. Dvorkin DV, Silaev MA, Tulsy VN et al. Problems of assessing the consumer's contribution to the distortion of the quality of electricity. *Electricity*. 2017; 7: 12–19. (in Russ.) doi: 10.24160/0013-5380-2017-7-12-19.
9. Cherepanov AV, Tikhomirov VA, Kutsiy AP. Influence of voltage asymmetry on energy efficiency. *Sovremennye tekhnologii. System analysis. Modeling*. 2017; 4 (56): 207-217. (in Russ.) doi: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).207-217.
10. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Application of a fuzzy inference system to assess the state of insulation of cable lines. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2021. V. 13. - No. 1 (49). - S. 191-203.
11. Kleshchov A, Hugi C, Terentiev O et al. Voltage asymmetry influence on resource consumption at power generating plants. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2019; 13: 219-227. doi: 10.4090/juee.2019.v13n2.219227.
12. Artemenko MYu, Batrak LM, Polishchuk SY. Current filtering in a three-phase three-wire power system at asymmetric sinusoidal voltages. *Electrical engineering & electromechanics*. 2018; 2: 63-68. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.11.
13. Vamvakari A, Kandianis A, Kladas A et al. Analysis of supply voltage distortion effects on induction motor operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2001; 16(3): 209-213. doi: 10.1109/60.937198.
14. Yalisho GL. Investigation & Minimization of Loss in Distribution System. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2016; 5(5): 45-50. doi:10.11648/j.epes.20160505.11
15. Allaev KR, Musinova GF. Analysis of power losses in phases in distribution networks at load imbalance. *Universum*. 2020; 6(75): 65-70. doi:10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.75
16. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Modeling cable lines heating by currents of higher harmonics and interharmonics. *ICIEAM 2019: Proceedings of the International conference on industrial engineering, applications and manufacturing; 25-29 March 2019; Sochi, Russia: IEEE*. doi:10.1109/ICIEAM.2019.8743089
17. Bellan D. Approximate circuit representation of voltage unbalance emission due to load asymmetry in three-phase power systems conference. *GEMCCON 2018: Proceedings of the 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference; 7-9 Nov 2018; Stellenbosch, South Africa: IEEE; 2018*. doi: 10.1109/GEMCCON.2018.8628545
18. Suvorov IF, Romanova VV, Khromov SV. Investigation of the effect of phase voltage asymmetry on the operating modes of asynchronous motors in the MATLAB/Simulink simulation environment. *Vestnik YuUrGU. Series: Energy*. 2016; 3: 72-83. (in Russ.) doi:10.14529/power160309
19. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Analysis of the heating of cable lines by currents of higher harmonics and interharmonics. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2020; 12, 2 (46): 61-67. (in Russ.)
20. Gracheva EI, Naumov OV, Gorlov AN, Shakurova ZM. Algorithms and probabilistic models of the parameters of the functioning of intraplant power supply. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(1): 93-104. (in Russ.) doi: 10.30724 / 1998-9903-2021-23-1-93-104.
21. Biryulin VI, Kudelina DV, Larin OM. Simulation of negative sequence voltage source determination in power supply systems. *FarEastCon 2020: Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies; 6-9 Oct. 2020; Vladivostok, Russia: IEEE*. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271409.
22. Biryulin VI, Kudelina DV, Larin OM. Asymmetry occurrence modeling in electrical supply systems. *FarEastCon 2020: Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies; 6-9 Oct. 2020; Vladivostok, Russia: IEEE*. doi:10.1109/FarEastCon50210.2020.9271179
23. Rozhkov VV, Krutikov KK, Trofimenko SR. Analysis of Operation Features for the Auxiliary Transformers at Power Plants in Non-Symmetric Modes. *ICIEAM 2021: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing; 7-21 May 2021; Sochi, Russia: IEEE; pp. 169-174*. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446295.
24. Rakhimov OS, Mirzoev DN, Gracheva EI. Experimental study of indicators of quality and losses of electricity in low-voltage rural electrical networks. *Proceedings of the higher*

educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(3): 209-222. (In Russ) doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222

25. Khatsevskiy KV, Antonov AI, Gonenko TV et al. The voltage asymmetry in electrical networks with single-phase load. *Dynamics 2017: Proceedings of the Dynamics of systems, mechanisms and machines, 14-16 Nov. 2017; Omsk, Russia: IEEE; pp. 1-4*. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239461.

26. Nenad AM, Slobodan NB, Jeroslav MZ. Application of Passive CL Filters for Neutralizing of Zero Sequence Currents and Correction of Asymmetries of Phase Voltages in Electrical Networks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2017; 9(5): 10-18. doi:10.5815/ijisa.2017.05.02

27. Ciontea CI, Iov F. A power study of load imbalance influence on quality assessment for distribution networks. *Electricity*. 2021; 2: 77–90. doi:10.3390/electricity2010005

28. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Simulation of the Higher Harmonics Source Determination in Power Supply Systems. *ICIEAM 2021: Proceedings of the International conference on industrial engineering, applications and manufacturing; May 17-21, 2021; Sochi, Russia: IEEE*. doi:10.1109/ICIEAM51226.2021.9446458

29. Naumov I, Podyakhikh S, Ivanov D. Efficiency of the balancing devices to power quality improve. *SAHD 2021: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference "Modern Science: Problems and Development Prospects (Social and Humanitarian Directions)"; April 26, 2021*. doi: 10.1051/shsconf/202110102012

30. Rudi DYU, Antonov AI, Gonenko TV et al. Metody snizheniya nesimmetrii napryazheniya v elektricheskikh setyakh 0,4-10 kV. *ONV*. 2018. №2 (158). (in Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-75-78

31. Naumov AA. Ensuring the required quality of electrical energy. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(1): 85-92. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92

Authors of the publication

Vladimir I. Biryulin - cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Power supply», Southwest State University.

Daria V. Kudelina - cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Power supply», Southwest State University

Получено 30.03.2022г.

Отредактировано 06.04.2022г.

Получено 20.04.2022г.