

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ НАПРЯЖЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ¹

SIMULATION OF THE ZERO SEQUENCE VOLTAGE SOURCES SEARCH IN POWER SUPPLY SYSTEMS²

**V. Biryulin
D. Kudelina**

Summary. The article deals with the issues related to ensuring the quality of electricity in power supply systems. It is shown that the quality of electrical energy can be determined by the operation of equipment in electrical networks not only of electricity producers and suppliers, but also of this energy consumers. The occurrence of power quality indicators unacceptable values leads to negative consequences and disruptions in the electrical equipment operation of power supply organizations and consumer power receivers, which causes losses and other undesirable consequences in case of power quality violations. The article presents the values of the voltage asymmetry coefficients for the negative and zero sequences obtained by the authors in the course of work on electricity quality monitoring. These results indicate that the negative sequence voltage in electrical networks with a voltage of 0.38 kV has lower values than the zero sequence voltage. It is shown on a computer model of the simplest power supply system that with a different arrangement of sources, the zero-sequence voltage phase values differ sharply from each other. Therefore, the use of monitoring the values of both the absolute value and the phase of the zero sequence voltage can be used for accelerated electrical energy quality monitoring and obtaining reasonable information about finding a source of the zero sequence voltage large values.

Keywords: quality, electricity, indicators, asymmetry, reverse sequence, zero sequence, computer simulation, electrical network, electricity consumers, current, voltage, phase.

Бирюлин Владимир Иванович

Кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный
государственный университет, Россия, Курск
bir1956@mail.ru

Куделина Дарья Васильевна

Кандидат технических наук, доцент,
Юго-Западный государственный университет,
Россия, Курск
mary_joy@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с обеспечением качества электроэнергии в системах электроснабжения. Показано, что качество электрической энергии может определяться работой оборудования в электрических сетях не только производителей и поставщиков электроэнергии, но также и потребителей этой энергии. Возникновение недопустимых значений показателей качества электроэнергии приводит к негативным последствиям и нарушениям работы электрооборудования энергоснабжающих организаций и электроприемников потребителей, что вызывает появление убытков и других нежелательных последствий при нарушениях качества электроэнергии. Приведены значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, полученные авторами статьи в ходе выполнения работ по мониторингу качества электроэнергии. Эти результаты свидетельствуют о том, что напряжение обратной последовательности в электрических сетях напряжением 0,38 кВ имеет меньшие значения, чем напряжение нулевой последовательности. Показано на компьютерной модели простейшей системы электроснабжения, что при различном расположении источников значения фазы напряжения нулевой последовательности резко отличается между собой. Поэтому применение контроля значений как модуля, так и фазы напряжения нулевой последовательности может использоваться для ускоренного мониторинга качества электрической энергии и получения обоснованной информации о нахождении источника больших значений напряжения нулевой последовательности.

Ключевые слова: качество, электроэнергия, показатели, несимметрия, обратная последовательность, нулевая последовательность, компьютерное моделирование, электрическая сеть, потребители электроэнергии, ток, напряжение, фаза.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности. 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» ельности» и ООО «Нижебогучанская ГЭС» в рамках договора № 488 от 09.09.2022

² The publication was carried out with the Russian Federation President Grant financial support for young scientists state support — Candidates of Science, project No. МК-5109.2022.4 «An automated system development for identifying objects which have a negative impact on power quality».

Введение

Системы электроснабжения предназначены для обеспечения потребителей электрической энергией в необходимых количествах и с требуемым ее качеством. Только при выполнении данных условий возможна нормальная работа многочисленных электроприемников, без которых практически невозможно представить жизнь современного общества. При этом необходимо помнить, что поставляемая потребителям электроэнергия является товаром, пусть и во многом отличным от других, более «материальных» товаров, и она также должна иметь соответствующее качество.

В общем случае качество того или иного товара, предлагаемого производителем на рынке, можно представить как совокупность тех или иных характеристик, отображающих основные свойства данного товара. Для электроэнергии качество устанавливается нормативными документами как соответствие установленных этими документами характеристик электроэнергии или показателей качества электроэнергии [1]. Данное соответствие должно выполняться в тех точках электрических сетей систем электроснабжения, где осуществляется передача электрической энергии от ее поставщиков к потребителям, или же, если сказать немного упрощенно, происходит продажа электроэнергии.

Чаще всего точка, в которой должно определяться качество электроэнергии, территориально находится там, где происходит разграничение электрических сетей согласно тем или иным документам, например, актам разграничения балансовой принадлежности электросетей и эксплуатационной ответственности сторон или по какому-то другому принципу.

Литературный обзор

При исследованиях качества электрической энергии следует помнить, что она имеет свойства, значительно отличающие ее от других товаров. Главным отличием является то, что процессы генерации, транспортировки и потребления электроэнергии являются непрерывными во времени. Также необходимо учитывать то, что на качество электроэнергии могут влиять не только ее производители (предприятия, осуществляющие генерацию электроэнергии), предприятия электросетей, выполняющие функции передачи электроэнергии, но также и ее потребители [2–4].

В общем случае к точке передачи электрической энергии оказываются подключенными электрические сети энергоснабжающих организаций и потребителей, причем, как первые, так и вторые подключения могут быть не в единичном числе. Поэтому при фиксации нарушения качества электроэнергии в точке ее передачи

возникает задача, имеющая большую актуальность — по какой причине возникает нарушение качества электроэнергии и кому принадлежит оборудование, создающее данное нарушение.

Не исключена, например, ситуация, при которой одновременно несколько потребителей создают это нарушение качества, но влияние каждого из потребителей на эти процессы может быть различным [5]. Разумеется, источники нарушения качества электроэнергии могут находиться и в электрических сетях электроэнергетических систем.

Актуальность данной задачи обуславливается еще и тем, что выход текущих значений показателей качества электрической энергии за нормативные границы неизбежно приводит к созданию неблагоприятных условий для подключенного к электрическим сетям электрооборудования и электроприемников, что неизбежно приведет к возникновению многих негативных последствий, создающих при неблагоприятных условиях убытки как для энергоснабжающих организаций, так и для потребителей [1, 2, 6].

Проблема поддержания качества электроэнергии в системах электроснабжения не теряет своей актуальности в настоящее время, как в нашей стране, так и в других, о чем свидетельствуют публикации как в российских источниках, так и в зарубежных [1, 2, 8–9]. Имеются также публикации различных авторов, работающих над проблемами качества электрической энергии в отдельных областях [10–14].

Рассмотрим более подробно проблемы определения источника нарушения качества электроэнергии в случае возникновения недопустимой несимметрии напряжений в трехфазной электрической сети. Известно, что несимметричная трехфазная система напряжений представляется тремя симметричными системами напряжений: прямой (аналогична симметричной трехфазной системе напряжений), обратной (чередование векторов напряжений обратно последовательности) и нулевой (все три вектора этой системы имеют одинаковое положение или же фазовый сдвиг между ними отсутствует) [15, 16].

Значения напряжений обратной и нулевой последовательностей, возникающие в электрической сети при несимметрии напряжений, используются для нормирования качества электроэнергии. С использованием этих напряжений рассчитываются показатели, определяющие качество электроэнергии — коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

На появление и величину несимметрии напряжений в трехфазной электрической сети могут влиять как энергоснабжающие организации [17], так и потребители электроэнергии [18, 19].

Авторы статьи неоднократно проводили работы по мониторингу качества электроэнергии, в ходе которых достаточно часто фиксировались случаи нарушения качества электроэнергии, связанные с недопустимым уровнем напряжения нулевой последовательности. Но нарушений качества электрической энергии, созданных большими значениями напряжений обратной последовательности, зафиксировано не было.

Для иллюстрации приведем ниже суточные графики изменений фазных напряжений, коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, полученные авторами статьи при проведении мониторинга — рис. 1, рис. 2, рис. 3.

Если провести анализ приведенных графиков, то можно сделать вывод о том, что на том энергетическом объекте, где производился мониторинг качества электрической энергии, наблюдается значительная разница между напряжениями отдельных фаз. Значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности находятся в пределах нормируемых значений (не более 2 % за 95 % времени интервала измерений и не более 4 % за 100 % времени интервала измерений). Значения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности не находятся в пределах нормируемых значений (не более 2 % за 95 % времени интервала измерений и не более 4 % за 100 % времени интервала измерений) — наблюдается неоднократное превышение значения, равного 4 %. Поэтому можно сделать итоговый вывод о наличии в рассматриваемой электрической сети напряжения нулевой последовательности с недопустимой величиной.

В общем случае возникновение в трехфазной электрической сети значительного напряжения нулевой последовательности неблагоприятно сказывается на режимах работы, прежде всего, электроприемников, подключаемых на фазное напряжение [20, 21]. Самое наглядное подтверждение такого влияния — это работа систем электрического освещения, так как при различии фазных напряжений электрические лампы, подключенные к фазе с более высоким напряжением, создают больший световой поток по отношению к лампам, питающимся от других фаз, но происходит негативное воздействие на срок службы ламп, находящихся под повышенным напряжением, — он резко снижается по сравнению с другими лампами, питающимися от фаз электрической сети с меньшим напряжением.

Также появление в электрических сетях значительных напряжений и токов нулевой последовательности

приводит и к другим негативным явлениям, включая и протекание больших токов в нулевых проводниках трехфазных сетей, выполненных по системе TN. Рост токов в нулевых проводниках происходит по той причине, что в отличие от токов прямой и обратной последовательностей токи нулевой последовательности не имеют фазного сдвига в 120° между собой, поэтому в нулевом проводнике происходит суммирование фазных токов нулевой последовательности.

В существующих системах электроснабжения к точке передачи электрической энергии (в которой должны выполняться требования по качеству электроэнергии) в общем случае может подключаться довольно большое количество потребителей электроэнергии, имеющих в своем составе разнородные электроприемники, в том числе и создающие несимметрию напряжений. Несимметрия напряжений может создаваться и в электрических сетях энергоснабжающих организаций.

В общем случае как потребители электроэнергии, так и энергоснабжающая организация могут создавать несимметрию напряжений, но при измерении показателей качества электроэнергии, включая и коэффициенты несимметрии напряжений, нельзя сделать однозначный вывод о причинах возникновения значительной несимметрии, даже в первом приближении — например, кто создает данную проблему — потребители или энергоснабжающая организация. Такое положение затрудняет разработку и внедрение эффективных мероприятий по повышению качества электроэнергии, так как истинная причина возникновения нарушения качества электроэнергии остается невыясненной.

Чтобы получить обоснованную оценку воздействия отдельного потребителя на качество электроэнергии в точках общего присоединения, необходимо максимально объективно оценить его вклад в создание несимметрии или же, другими словами, определить долевой вклад потребителя. Эта оценка крайне важна для принятия обоснованных решений по повышению качества электроэнергии.

Различные подходы к определению долевого вклада потребителя в процессы снижения качества электроэнергии, включая и несимметрию, представлены во многих источниках, например — [5, 18, 19]. Но несмотря на это, на сегодняшний день не разработана универсальная методика оценки вклада потребителей в несимметрию напряжений в трехфазной электрической сети.

Материалы и методы

Ранее предложенные способы определения вклада потребителей в нарушение качества электроэнергии из-за недопустимой несимметрии напряжений, использовали следующие подходы:

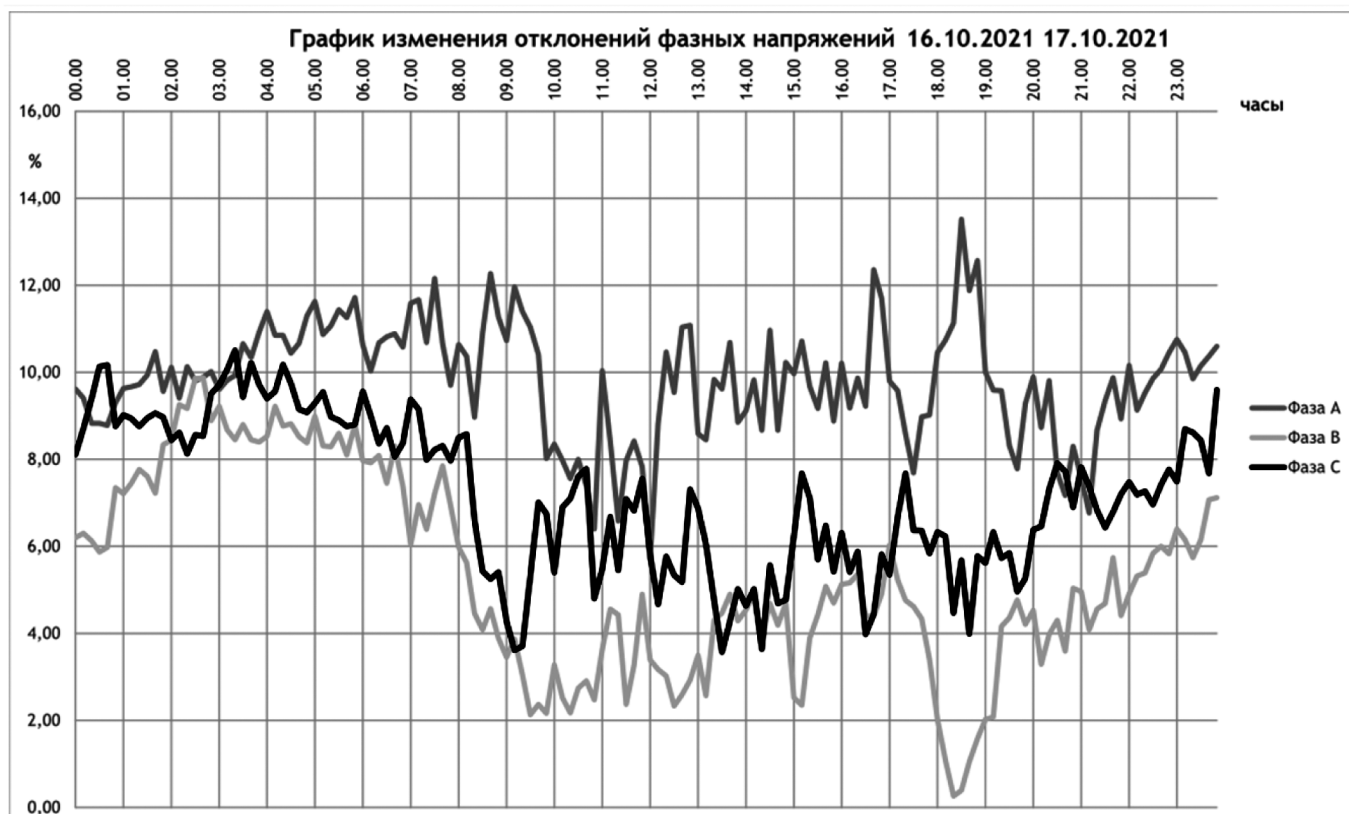


Рис. 1. Суточный график изменения фазных напряжений в трехфазной электрической сети



Рис. 2. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в трехфазной электрической сети



Рис. 3. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в трехфазной электрической сети

- определение характера изменения показателей при процессах отключения или подключения отдельных электроприемников;
- расчете параметров, влияющих на нарушение качества электроэнергии (в первую очередь токов) отдельных электроприемников;
- сопоставление мощности потребителя и мощности короткого замыкания в точке передачи электроэнергии;
- определение значения активной составляющей полной мощности нулевой последовательности, потребляемой из электрической сети, у рассматриваемого потребителя.

Данные методы направлены на выявление источников несимметрии напряжений, расположенных в электрических сетях потребителей, но в случае создания несимметрии напряжений в электрических сетях энергоснабжающей организации использование данных методов не может привести к правильному результату.

При проведении мониторинга качества электрической энергии в системах электроснабжения на первом этапе его проведения может быть актуальна задача первоначального определения места расположения источ-

ников нарушения качества, создающих значительную несимметрию напряжений. Очевидно, что для массового применения в сложных современных системах электроснабжения аппаратура, пусть и обеспечивающая первоначальный поиск источников, должна быть достаточно простой по своему построению, чтобы сократить трудозатраты на мониторинг и избежать вероятных ошибок персонала при проведении измерений.

Авторами статьи проведен анализ возможности использования параметров токов и напряжений нулевой последовательности для быстрого определения места возникновения несимметрии или же получения обоснованной информации, в какой сети располагается источник нарушения качества электрической энергии по напряжению нулевой последовательности — в электрической сети поставщика электроэнергии или же в электросетях потребителей. Чтобы рассмотреть более подробно возможное применение данного способа, выполним компьютерное моделирование как симметричного, так и несимметричных режимов работы простейшей схемы электроснабжения, состоящей из источника питания или поставщика электроэнергии и подключенного к ней потребителя электроэнергии.

Результаты

На рис.4 приведена схема такой компьютерной модели, разработанной в системе научно-технических расчетов MatLab, пакет расширения этой системы Simulink. Нагрузка потребителя электроэнергии принята по своему характеру чисто активной, что в большей степени характерно для потребителей электроэнергии жилищно-коммунального сектора, где в основном и фиксировались случаи нарушения симметрии напряжений авторами статьи при проведении мониторинга качества электроэнергии.

Междуфазное напряжение источника электроэнергии установлено равным 380 В, значение сопротивления источника, установленное при моделировании, определяет его большую мощность по сравнению с нагрузкой потребителя. Последовательно с фазой А источника питания системы электроснабжения соединяется дополнительный источник напряжения для использования его при моделировании расположения источника несимметрии в электрической сети поставщика электроэнергии, для чего с его помощью создается неравенство фазных напряжений. При первом моделировании значение его напряжения устанавливалось равным нулю.

Измерение электрических величин в компьютерной модели осуществляется следующими блоками:

- мультиметр Multimeter (измерение напряжений и токов нагрузки);

- 3-x phase meas (измеритель параметров режимов 3-х фазных цепей);
- Zero Seq (измеритель напряжения нулевой последовательности);
- Zero Seq1 (измеритель тока нулевой последовательности).

Для контроля и анализа работы моделируемой схемы значения измеренных параметров выводятся на соответствующие блоки индикации (дисплеи) с преобразованием мгновенных значений в действующие с помощью блоков RMS. Для напряжения нулевой последовательности выводится значение напряжения (Magnit U0) и фазового угла в градусах — Angle (Deg). Для тока нулевой последовательности выводится значение напряжения (Magnit I0) и фазового угла в градусах — Angle (Deg)1.

На рис. 4 показано моделирование полностью симметричного режима работы изучаемой простейшей системы электроснабжения. Как видно по показаниям дисплеев в данном режиме — ток и напряжение нулевой последовательности имеют значения, практически равные нулю.

На рис. 5 представлено моделирование несимметричного режима работы, причиной которого служит неравномерная нагрузка по фазам в электрической сети потребителя.

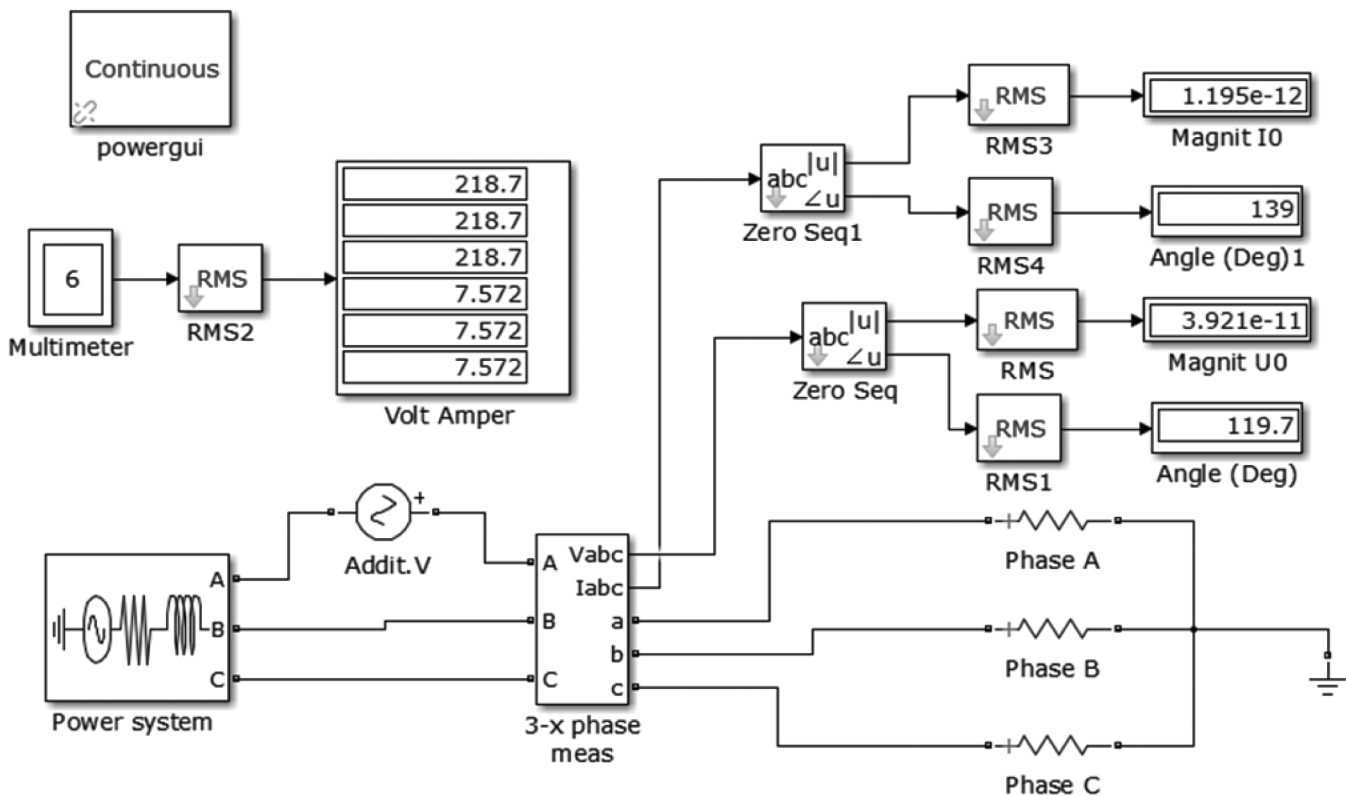


Рис. 4. Компьютерная модель для исследования режимов работы простейшей системы электроснабжения

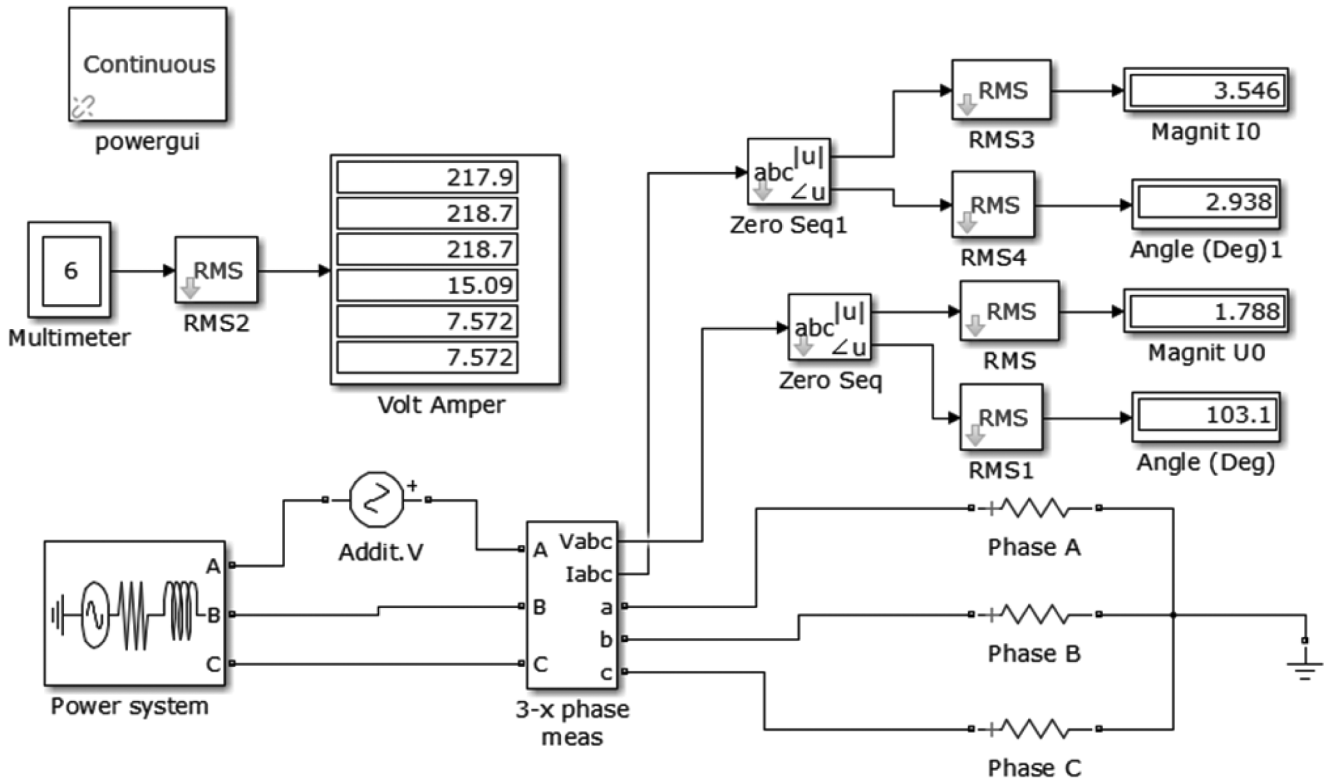


Рис. 5. Компьютерная модель при несимметричном режиме работы потребителя

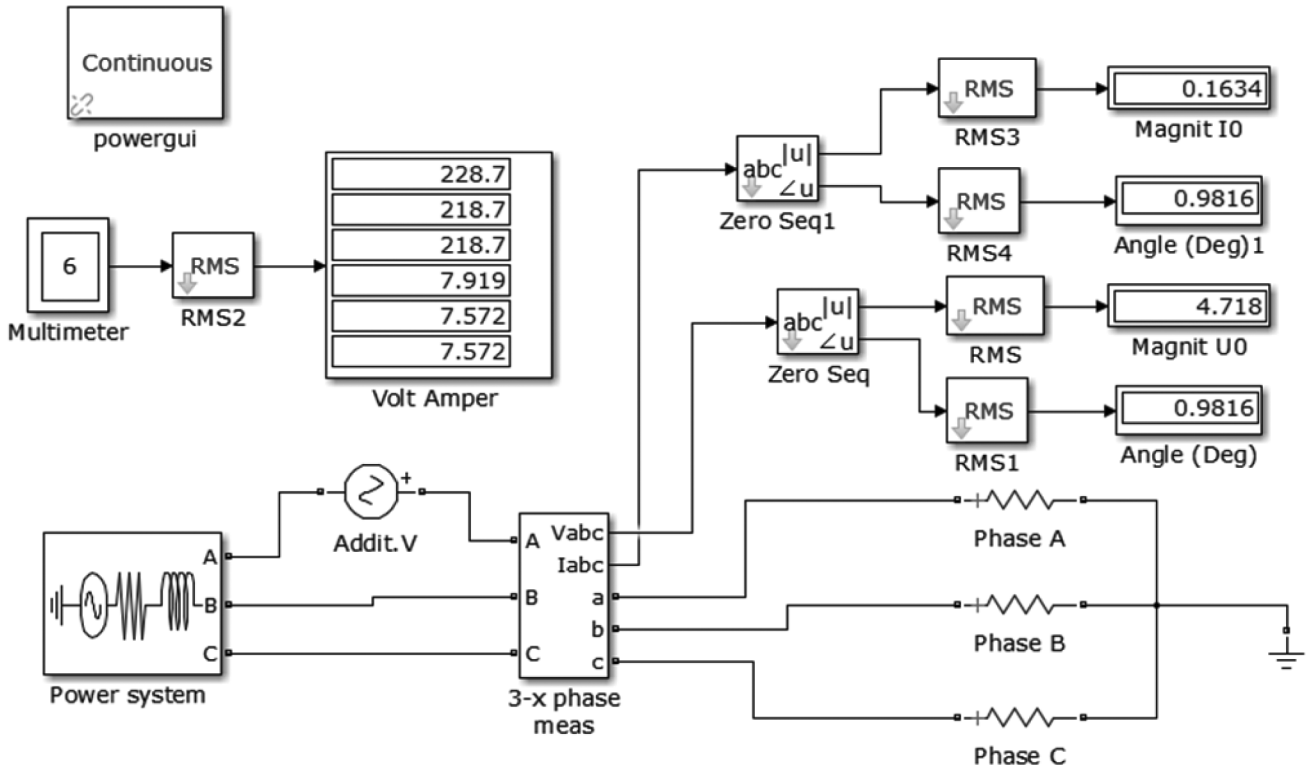


Рис. 6. Компьютерная модель при несимметричном режиме работы поставщика электроэнергии

В данной модели увеличена мощность нагрузки в фазе А (что видно по показаниям дисплея, подключенного к мультиметру). В отличие от предыдущего режима, напряжение и ток нулевой последовательности стано-

вятся отличными от нуля, что показывают соответствующие дисплеи.

Далее производилось моделирование возникновения несимметричного режима в электрической сети

поставщика электроэнергии (источника, питающего нагрузку потребителя) — рис. 6. Для этого было изменено напряжение дополнительного источника, включенного последовательно с фазой А основного источника питания. Значения мощности нагрузки в этом режиме были приняты одинаковыми.

Обсуждение

Произведем сравнение с предшествующим режимом (неравномерная нагрузка по фазам в электрической сети потребителя). Как в первом, так и во втором случае, ток и напряжение нулевой последовательности становятся отличными от нуля. Но изучение полученных данных показывает, что наблюдается резкое отличие от предыдущего режима по фазе напряжения нулевой последовательности. При несимметричном режиме работы потребителя (источник питания был симметричным) фаза этого напряжения составляла $103,1^\circ$, во втором же режиме, когда нагрузка потребителя была симметрична,

а источник несимметричным, данная фаза имела значение — $0,98^\circ$.

Заключение

Приведенные результаты моделирования различных режимов работы простейшей системы электроснабжения показывают возможность использования при мониторинге качества электрической энергии в случае выявления недопустимых значений несимметрии напряжения задачу по определению нахождения источника нарушения качества электрической энергии, хотя бы в первом приближении. Для этой цели необходимо использовать значения фазы напряжения нулевой последовательности. Определение значений как модулей, так и фаз токов и напряжений нулевой последовательности не является в наше время сложной технической задачей и может быть достаточно просто выполнимым на базе современных технологий.

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. Коверникова Л.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Н. Качество электроэнергии в ЕЭС России: Текущие проблемы и необходимые решения // Электроэнергия: Передача и распределение. 2016. № 2(35). С. 28–38.
3. Дед А.В., Сикорский С.П., Смирнов П.С. Некоторые вопросы сертификации электрической энергии по показателям качества // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 89–92.
4. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
5. 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.
6. Авербух М.А., Жилин Е.В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 40–45.
7. 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.
8. Bellan D. On the statistics of noisy space vector in power quality analysis // International Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol 8(5). Pp. 2177–2183. doi: 10.21817/ijet/2016/v8i5/160805050.
9. Белицкий А.А., Шклярский Я.Э. Оценка добавочных потерь мощности в электрических сетях с нелинейной и несимметричной нагрузкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 86–93.
10. Коверникова Л.И. Активные мощности гармоник в узле присоединения нелинейных нагрузок в сети высокого напряжения // Электричество. 2017. № 3. С. 12–20.
11. Manap M., Jopri M.H., Abdullah A.R. et al. A verification of periodogram technique for harmonic source diagnostic analytic by using logistic regression // TELKOMNIKA. 2019. Vol. 17. №1. pp. 497–507. doi:10.12928/TELKOMNIKA.v17i1.10390.
12. Lei D., Yang Yu., Zhang S., Qin B., Zhang Xu. An estimation algorithm of harmonic source location based on ELM. ICIEA 2019: Proceedings of the 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications; 19-21 June 2019; Xi'an, China: IEEE. doi: 10.1109/ICIEA.2019.8834307
13. Bellan D. Approximate circuit representation of voltage unbalance emission due to load asymmetry in three-phase power systems. GEMCCON 2018: Proceedings of the 4th Global electromagnetic compatibility conference; 7-9 Nov. 2018; Stellenbosch, South Africa: IEEE. doi: 10.1109/GEMCCON.2018.8628545.
14. Raheel M., Umair T. Analytical behaviour of line asymmetries in three phase power systems. RAEE 2017: Conference: Proceedings of the International symposium on recent advances in electrical engineering; 24–26 Oct. 2017; Islamabad, Pakistan: IEEE. doi: 10.1109/RAEE.2017.8246143.
15. Альмиева Д.С., Галеева Р.У. Влияние несимметрии напряжения по обратной последовательности на характеристики высоковольтных асинхронных двигателей // Труды III российской молодежной научной школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи»; 21–23 октября 2015 г., Томск. Томск: СКАН, 2015. С. 184–188.
16. Романова В.В., Хромов С.В. Определение вероятности возникновения несимметрии напряжений, снижающих надёжность асинхронных двигателей // Материалы конф. ГНИИ «Нацразвитие»: сб. избр. ст. Санкт-Петербург: Изд-во ГНИИ, 2017. С. 80–86.

17. Сафонов Д.Г., Ощепков В.А., Гиршин С.С. Определение напряжения нулевой последовательности с учетом естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи // Омский научный вестник. 2016. №1(145). С. 58–60.
18. Костюков Д.А. Оценка вклада потребителя в несимметрию напряжений по нулевой последовательности в точке общего присоединения // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2018. № 6 (69). С. 24–34.
19. Руди Д.Ю., Коровин Д.А. Исследование коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в распределительных сетях низкого напряжения // Труды VI Международной научной конференции «Технические науки: проблемы и перспективы»; июль 2018 г., Санкт-Петербург. СПб.: Свое издательство, 2018. С. 38–43.
20. Романова В.В., Дейс Д.А., Хромов С.В. Влияние искажения симметрии питающей сети на режимы работы асинхронного двигателя // Новый взгляд. Международный научный вестник. 2016. № 11. С. 134–142.
21. Руди Д.Ю., Качук Н.А. Негативное влияние несимметрии и методы их устранения в системе электроснабжения // Труды XX Международной научно-практической конференции «Теория и практика современной науки»; 22 марта 2017 г., Омск. Омск: Олимп, 2017. С. 87–91.

© Бирюлин Владимир Иванович (bir1956@mail.ru); Куделина Дарья Васильевна (mary_joy@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»