

## МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4–10 КВ

В статье описаны процессы, связанные с появлением несимметрии трехфазной системы напряжений в электрических сетях, пояснены причины, почему это явление является нежелательным. Рассмотрены причины возникновения несимметрии напряжений и их влияние на работу электрического оборудования и на энергосистему в целом. Рассмотрены вопросы снижения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности и даны основные рекомендации, позволяющие улучшить качество электроэнергии для соответствия его требованиям ГОСТа 32144-2013. В заключение отмечено, что на данный момент проблема несимметрии напряжений требует незамедлительного решения, так как электрические сети 0,4–10 кВ характеризуются значительной несимметрией напряжений.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, коэффициент несимметрии напряжения, несимметрия, потери электроэнергии, симметрирующее устройство, электрическая сеть низкого напряжения.

В настоящее время качество электроэнергии нормируется согласно действующему межгосударственному стандарту ГОСТ 32144-13 [1], принятому взамен национального стандарта ГОСТ 54149-10 [2] и ГОСТ 13109-97 [3]. Данный стандарт устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии в точках передачи её потребителям на различных уровнях напряжения переменного тока частотой 50 Гц в системах электроснабжения общего назначения.

Одной из причин ухудшения качества электрической энергии является несимметрия напряжений в электросети [4]. Если трехфазное напряжение имеет одинаковую величину и находится в фазном смещении, равном  $120^\circ$ , то трехфазное напряжение называется симметричным. При нарушении симметрии многофазной системы последнюю можно разложить на три симметричные составляющие — систему прямой последовательности и накладываемые на неё системы обратной и нулевой последовательности [4]. Как правило, трехфазный

баланс напряжений является идеальной ситуацией для энергосистемы. Однако однофазные нагрузки, несимметричное трехфазное оборудование и устройства, плохие соединения с электрическими разъемами и многие другие факторы вызывают несимметрию напряжений в энергосистеме и снижают качество электроэнергии. Таким образом, несимметрия напряжений является одной из актуальных проблем электроэнергетических систем [5–7].

Кроме перечисленных, причиной несимметрии напряжений могут служить аварийные ситуации в сетях, такие как несимметричные короткие замыкания или обрывы фаз [8].

Рассмотрим основные последствия несимметрии напряжений.

1. Дополнительные потери мощности.

Несимметрия напряжений всегда вызывает дополнительные потери мощности в энергосистеме. Чем выше коэффициент несимметрии напряжений, тем больше рассеиваемая мощность. Это приводит в итоге к повышенным затратам при оплате за элек-

троэнергию [9], нагреванию обмоток двигателя, что может привести к разрушению их изоляции.

## 2. Ненормальная работа двигателя.

В общем случае трехфазный двигатель, питаемый симметричным трехфазным напряжением, создает прямой крутящий момент. Напряжение обратной последовательности, вызванное несимметрией напряжения, создает противоположный тормозной момент, приводит к вибрации и шуму двигателя.

## 3. Снижение жизненного цикла оборудования.

Высокие температуры, превышающие номинальные значения для устройств, значительно сокращают срок службы этих устройств и ускоряют цикл их замены, что значительно увеличивает затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования.

## 4. Влияние на работу реле.

Высокий ток нулевой последовательности, возникающий вследствие несимметрии напряжений, может привести к нарушениям работы реле или уменьшить чувствительность наземного реле. Это может привести к серьезным проблемам с точки зрения безопасности энергосистемы.

## 5. Неточные измерения.

Обратная и нулевая последовательности напряжений или токов приводят к неточным измерениям у многих видов измерительных приборов. Неточность измеренных значений может повлиять на пригодность настроек и координацию систем релейной защиты, правильность решений некоторых автоматических функций системы.

## 6. Влияние на работу трансформатора.

Трехфазное напряжение с высоким коэффициентом несимметрии напряжений может привести к тому, что поток внутри сердечника трансформатора будет несимметричным. Этот несимметричный поток вызовет дополнительные магнитные потери в сердечнике, повышение температуры обмоток и может даже привести к повреждению трансформатора.

## 7. Увеличение несимметрии напряжений при повреждении нейтрального провода.

В этом случае речь идет о влиянии поврежденного нейтрального провода на несимметрию напряжений. Для системы высокое сопротивление нейтрального провода может увеличить несимметрию напряжений, следовательно, повредить подключенное оборудование, в тяжелом случае — уничтожить все оборудование.

В целом, последствия появления несимметрии напряжений в энергосистемах являются широкими и серьезными. Несимметрия напряжений может значительно сократить жизненный цикл оборудования, ускорить его замену и увеличить затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание системы.

Для устранения неслучайной несимметрии напряжений в энергосистеме необходимо ещё на ранних стадиях проектирования разработать схему равномерного подключения нагрузок. При этом необходимо учесть их мощности и графики работ. Согласно [8], равномерное пофазное распределение нагрузок в сетях низших напряжений гарантирует снижение коэффициентов несимметрии напряжений по прямой и обратной последовательности в электрических сетях на 20 %.

В соответствии с ГОСТом 32144-13 несимметрия трехфазной системы напряжений оценивается такими показателями качества электроэнергии (КЭ), как коэффициент несимметрии по обратной

последовательности  $K_{2U}$ , % и нулевой последовательности  $K_{0U}$ , %. Данные коэффициенты являются нормированными показателями качества. Согласно [1], КЭ по коэффициентам несимметрии считают соответствующими требованиям данного стандарта, если усредненные в интервале 10 минут значения коэффициентов не превышают 2 % в течение 95 % времени в одну неделю и не выходят за пределы 4 % в течение 100 % этого интервала.

Данные нормы являются обязательными для всех режимов работы электроснабжения, исключением являются лишь режимы, обусловленные непредвиденными обстоятельствами [1–3].

Значения коэффициентов несимметрии напряжений определяются по формулам [4, 10]:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% , \quad (1)$$

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где  $U_2$  — напряжение обратной последовательности;  $U_0$  — напряжение нулевой последовательности;  $U_1$  — напряжение прямой последовательности.

Ранее описывалось, что несимметрия напряжений создает дополнительные потери мощности, снижает эффективность системы, уменьшает жизненные циклы и т.д. Кроме того, некоторые ненормальные режимы работы оборудования (например, короткое замыкание в энергосистеме) могут приводить к несимметрии напряжений и оказывать негативное воздействие на систему и оборудование. Для решения этих проблем существует несколько мероприятий.

### 1. Увеличение мощности трансформатора в системе.

В работе [11] исследуются зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности для высокого и низкого напряжения от мощности силового трансформатора. В ходе эксперимента при уменьшении мощности трансформатора на низком напряжении коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности увеличивается, а на высоком — уменьшается. Причем данные зависимости наблюдаются при разных мощностях источника напряжения, разница лишь в том, что при более высокой мощности источника зависимости как для высокого, так и для низкого напряжения начинаются с меньших значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Увеличение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети низкого напряжения при снижении мощности трансформатора можно объяснить тем, что мощность нагрузки растет относительно мощности трансформатора и запас по мощности трансформатора уменьшается.

При этом с увеличением мощности источника питания возрастает степень увеличения значений коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности при снижении мощности силового трансформатора.

Уменьшение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжения 10 кВ при снижении мощности трансформатора можно объяснить тем, что мощность источника напряжения относительно мощности трансформатора увеличивается и, соответственно,

увеличивается запас по мощности источника питания.

При этом с увеличением мощности источника питания уменьшается степень уменьшения значений коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности при снижении мощности силового трансформатора.

### 2. Использование межфазных переменных сопротивлений.

Одним из способов снижения несимметрии напряжений является выравнивание нагрузок по фазам. Техническим решением данного способа является введение дополнительного межфазного переменного сопротивления. В работе [12] выявленные зависимости позволяют определиться с направлением и порядком изменения значений сопротивлений. При этом становится известным, как изменятся значения линейных напряжений, что позволит найти верное направление для уменьшения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. Варьируя данными зависимостями, можно подобрать конечные значения межфазных сопротивлений, при которых значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности станет в пределах, нормируемых ГОСТ 32144-3013.

### 3. Применение симметрирующего устройства.

Еще одним техническим решением выравнивания нагрузок по фазам является введение симметрирующего устройства трансформаторного типа. Реализуется оно с помощью изменения величины емкости конденсатора или индуктивности катушки. Проведенные исследования, описанные в статье [10], показали, что такое симметрирующее устройство позволяет снизить несимметрию напряжений до тех значений, которые нормируются ГОСТом 32144-2013.

Исходя из выше изложенного, необходимо отметить, что несимметрия напряжений отрицательно влияет на работу двигателей, трансформаторов, конденсаторных батарей, выпрямителей и линий электропередач [13–16], вызывая дополнительные потери энергии и создавая проблемы безопасности для энергосистемы.

Вопрос решения научно-технической задачи определения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности не решен в связи с отсутствием соответствующего стандарта. Поэтому возникает необходимость в разработке алгоритма по её определению [17], что позволит своевременно обнаруживать данную помеху и вероятность её появления в электрических сетях любого уровня напряжения и тем самым оценивать уровень опасности от данной помехи. Данный алгоритм позволит сделать шаг вперед на пути к подавлению несимметрии напряжений по обратной последовательности, что является актуальным на сегодняшний день.

### Библиографический список

1. ГОСТ 32144-13. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. ГОСТ 54149-10. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2013–01–01. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.

3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (взамен ГОСТ 13109-87). Введ. 1999–01–01. М.: Стандартинформ, 1998. 32 с.

4. Руди Д. Ю., Ткачук Н. А. Негативное влияние несимметрии и методы их устранения в системе электроснабжения // Теория и практика современной науки: сб. науч. тр. по материалам XX Междунар. науч.-практ. конф. М.: Олимп, 2017. С. 87–91.

5. Давыденко М. Е., Сахибгараева Р. Ф. Несимметрия напряжений в электрических сетях 0,38–10 кВ // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова: сб. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2015. С. 3155–3161.

6. Ануфриев А. И., Платонов И. Ю., Агеев В. А. [и др.]. Анализ несимметрии и отклонения напряжения в распределительных сетях 0,4 кВ // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: междуз. сб. науч. тр. Саранск: Изд-во МГУ им. Н. П. Огарёва, 2016. С. 186–190.

7. Сариев Б. И., Куржумбаева Р. Б., Абдиева З. Э. [и др.]. Влияние несимметрии напряжения на потери электроэнергии в системах электроснабжения // Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 46–51.

8. Скороходов В. А. Методы и технические средства повышения качества электроэнергии и компенсации. М.: Энергоатомиздат, 1992. 152 с.

9. Дед А. В., Паршукова А. В., Халитов Н. А. Оценка дополнительных потерь мощности от несимметрии напряжений и токов в элементах систем электроснабжения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 10-3. С. 421–425.

10. Руди Д. Ю., Антонов А. И., Руппель А. А., Руппель Е. Ю. Исследование снижения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности с помощью симметрирующего устройства трансформаторного типа // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 103–106.

11. Антонов А. И., Зозуля Е. Ю., Руди Д. Ю. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности от мощности силового трансформатора // World Science: Problems and Innovations: сб. ст. победителей VI Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Пенза: Наука и Просвещение, 2016. Ч. 1. С. 80–85.

12. Антонов А. И., Вишнягов М. Г., Зубанов Д. А. [и др.] К вопросу изменения значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности при различных значениях межфазных сопротивлений // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 77–81.

13. Романова В. В., Хромов С. В. Определение вероятности возникновения несимметрии напряжений снижающих надёжность асинхронных двигателей / ред. Ю. Ф. Эльсесер; отв. за выпуск Л. А. Павлов // Материалы конф. ГНИИ «Нацразвитие»: сб. избр. ст. СПб.: Изд-во ГНИИ, 2017. С. 80–86.

14. 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.

15. Шелехина Л. Ю., Ахтырская А. Ю. Влияние несимметрии токов и напряжений на работу электрооборудования // Россия в XXI веке: факторы и механизмы устойчивого развития: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2016. С. 25–28.

16. Альмиева Д. С., Галеева Р. У. Влияние несимметрии напряжения по обратной последовательности на характеристики высоковольтных асинхронных двигателей // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы III Рос. молодеж. науч. шк.-конф. Томск: СКАН, 2015. С. 184–188.

17. А. с. Российская Федерация. Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по

коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности / Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А. [и др.]. № 23380; заявл. 27.12.2017 г. // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2017. № 12 (103). С. 66.

**РУДИ Дмитрий Юрьевич**, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (ОИВТ) (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ).

SPIN-код: 5222-7906

AuthorID (РИНЦ): 830094

**АНТОНОВ Александр Игоревич**, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

SPIN-код: 5682-8929

AuthorID (РИНЦ): 842787

**ГОНЕНКО Татьяна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Автоматизация и робототехника» ОмГТУ; доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

SPIN-код: 7291-5494

AuthorID (РИНЦ): 465855

**КЛЕУТИН Владислав Иванович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Элек-

тротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

SPIN-код: 8950-3024

AuthorID (РИНЦ): 564398

**РУППЕЛЬ Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

SPIN-код: 3386-9834

AuthorID (РИНЦ): 423886

**РУППЕЛЬ Елена Юрьевна**, доцент (Россия), доцент кафедры «Высшая математика» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.

SPIN-код: 3193-1914

AuthorID (РИНЦ): 651948

Адрес для переписки: dima\_rudi@mail.ru

#### Для цитирования

Руди Д. Ю., Антонов А. И., Гоненко Т. В., Клеутин В. И., Руппель А. А., Руппель Е. Ю. Методы снижения несимметрии напряжения в электрических сетях 0,4–10 кВ // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 75–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-75-78.

Статья поступила в редакцию 12.02.2018 г.

© Д. Ю. Руди, А. И. Антонов, Т. В. Гоненко, В. И. Клеутин, А. А. Руппель, Е. Ю. Руппель

УДК 621.31

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-78-83

**В. А. КОПЫРИН**  
**О. В. СМИРНОВ**  
**А. Л. ПОРТНЯГИН**

Тюменский  
индустриальный университет,  
г. Тюмень

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНУТРИСКВАЖИННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В статье приведена оценка энергетической эффективности использования внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности в составе установок электроцентробежных насосов. Разработана схема замещения электротехнического комплекса установки для добычи нефти. Построены кривые функции энергоэффективности, характеризующей положительный эффект от внедрения внутрискважинных компенсаторов для различных сечений и длин питающих кабелей.

**Ключевые слова:** внутрискважинный компенсатор, кабельная линия, погружной асинхронный электродвигатель, трансформатор, электроцентробежный насос.

**Введение.** В настоящее время повышение энергоэффективности производства является общемировой тенденцией. С юридической точки зрения, под энергоэффективностью понимаются характери-

стики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно