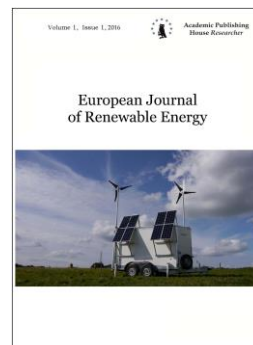


Copyright © 2017 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic
European Journal of Renewable Energy
Has been issued since 2016.
E-ISSN 2454-0870
2017, 2(1): 36-43

DOI: 10.13187/ejore.2017.1.36
www.ejournal51.com



Optimization of Electricity Losses in Distribution Networks

R.R. Sadrislamov ^a

^a Udmurt State University, Russian Federation

Abstract

This article explores the theoretical aspects of three-phase distribution networks in asymmetric modes, including the causes of the unbalance and its influence on the constituent elements of the network and the power losses in the networks. It is indicated that these indicators of power quality, like voltage unbalance and deviation of the stress cannot be considered separately. There would also be the simplest circuit simulation circuit of three-phase AC single-ended modes in OrCAD, and the impact of the neutral wire on the magnitude of phase voltage VC. Indicate the waveforms of currents and voltages in three-phase network with uneven loading of the phases. It will be shown that the asymmetry of the currents in the network takes place in the absence of the neutral wire and, if equipped.

Keywords: energy loss, energy efficiency, optimization of losses.

1. Введение

Устранение не симметрии токов и напряжения в распределительных сетях как один из методов оптимизация потерь электроэнергии в распределительных сетях. Электрические распределительные сети напряжением 0,4 – 10 кВ отличаются от электрических сетей более высоких классов напряжений: по своему составу; неоднородности размещения электроприемников (ЭП) различных категорий; по типам коммутационных аппаратов, по уровню резервирования. Этими сетями обслуживаются потребители электроэнергии, которых можно условно разделить на следующие группы: коммунально-бытовые; промышленные; электрифицированный транспорт; производственные потребители сельского хозяйства; прочие потребители. Сюда попадает основная категория ЭП, обеспечивающие жизнедеятельность человека, что налагает огромную ответственность, которая возложена на распределительные сети данного диапазона. Эти отличия ставят распределительные сети в разряд простейших и одновременно достаточно сложных для обеспечения требуемой надежности функционирования электроустановок.

Все это обуславливает необходимость обеспечения требуемого качества электроэнергии. Оно характеризуется рядом показателей, одним из которых является несимметрия напряжения (ГОСТ 13109-97). Несимметрия напряжений появляется из-за несимметрии токов, то есть токов нагрузки, протекающих по элементам системы электроснабжения.

Исходя вышесказанного, можно сделать вывод, что исследование влияния несимметрии токов и напряжения на электрические сети 0,4 – 10 кВ представляет научный и практический интерес, и уменьшение этого явления также позволит уменьшить и оптимизировать потери электроэнергии в распределительных сетях.

2. Обсуждение и результаты

Оптимизация потерь электроэнергии в распределительных сетях

Устранение несимметрии токов и напряжения в распределительных сетях как один из методов оптимизации потерь электроэнергии в распределительных сетях. Электрические распределительные сети напряжением 0,4 – 10 кВ отличаются от электрических сетей более высоких классов напряжений: по своему составу; неоднородности размещения электроприемников (ЭП) различных категорий; по типам коммутационных аппаратов, по уровню резервирования. Этими сетями обслуживаются потребители электроэнергии, которых можно условно разделить на следующие группы: коммунально-бытовые; промышленные; электрифицированный транспорт; производственные потребители сельского хозяйства; прочие потребители. Сюда попадает основная категория ЭП, обеспечивающие жизнедеятельность человека, что налагает огромную ответственность, которая возложена на распределительные сети данного диапазона. Эти отличия ставят распределительные сети в разряд простейших и одновременно достаточно сложных для обеспечения требуемой надежности функционирования электроустановок.

Все это обуславливает необходимость обеспечения требуемого качества электроэнергии. Оно характеризуется рядом показателей, одним из которых является несимметрия напряжения (ГОСТ 13109-97). Несимметрия напряжений появляется из-за несимметрии токов, то есть токов нагрузки, протекающих по элементам системы электроснабжения.

Исходя вышесказанного, можно сделать вывод, что исследование влияния несимметрии токов и напряжения на электрические сети 0,4 – 10 кВ представляет научный и практический интерес, и уменьшение этого явления также позволит уменьшить и оптимизировать потери электроэнергии в распределительных сетях.

Источниками несимметрии напряжений являются: в сетях 0,4 кВ – бытовые однофазные ЭП; в сетях более высоких напряжений – однофазные ЭП промышленного назначения, тяговые подстанции, а также трехфазные ЭП с неодинаковым потреблением электроэнергии по фазам (дуговые сталеплавильные печи) (ГОСТ Р 54149-2010). Но основной причиной появления чрезмерных отклонений величины напряжения от номинального является обрыв нулевого провода. При этом согласно (Нормы качества, 1998) недопустимые повышения напряжения возможны и при необходимом качестве заземления данной линии.

На стадии проектирования электрических сетей закладываются нормы несимметрии напряжения, которые принимаются согласно вышеупомянутой ГОСТ. Однако в процессе эксплуатации сетей и подключением к нему все больше потребителей с однофазной и трехфазной нагрузкой, вероятность возникновения несимметричной работы возрастает, а соответственно возрастают и потери электроэнергии. Различают систематическую и вероятностную несимметрию (ГОСТ Р 54149-2010). Систематическая несимметрия характеризуется постоянной перегрузкой одной из фаз, в то время как, вероятностная несимметрия – попеременной перегрузкой то одной, то другой фазы. Оба вида несимметрии, при их превышении заданных значений, являются следствием аварийной работы распределительной сети. Данные для расчета показателей качества электроэнергии обычно берутся путем измерения.

Несимметрия напряжения в трехфазной сети в свою очередь приводит к ухудшению еще одного показателя электроэнергии, как отклонение напряжения, который наблюдается в его фазах, и увеличению потерь электроэнергии. Отклонение напряжения – это отличие фактического напряжения в установившемся режиме работы системы электроснабжения от его номинального значения.

При этом отклонения напряжения у ЭП перегруженной фазы могут превысить допустимые значения. Кроме ухудшения режима напряжения у ЭП, при несимметричном режиме существенно ухудшаются условия работы как самих ЭП, так и всех элементов сети, как релейная защита, коммутационная аппаратура, что ведет к снижению надежности работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом. Известно, что значительные токи нулевой последовательности, протекающие через нулевой проводник недостаточного сечения, могут вызвать его сильный нагрев (Железко, 2014). Зарегистрирован ряд случаев возникновения пожаров в зданиях из-за перегрева нулевых

проводников, сечение которых составляло 25 или 50 % фазного провода. Стоит отметить также, что при несимметрии может быть нарушено правильное функционирование счетчиков. Особенно это актуально для систем автоматического контроля энергопотребления, в которых в автоматическом режиме снимаются данные энергопотребления. Неправильные значения могут привести к ошибкам в прогнозе энергопотребления.

В настоящее время, при разработке объекта широко используются компьютерные системы моделирования. Одной из таких программ является программный пакет схемотехнического моделирования OrCAD, который имеет все возможности для полного исследования электрических схем любой сложности (Кужепов, Гончаров, 2011), в том числе получить данные для расчета показателей несимметрии.

Для практической реализации поставленной задачи были собраны простейшие схемотехнические модели цепи трехфазного переменного тока с активными фазными нагрузками в несимметричных режимах в пакете OrCAD. а также влияния нейтрального провода на величину фазных напряжений электроприемников и потерь электроэнергии в распределительных сетях.

Целесообразно рассмотреть два варианта схем:

1. Исследование распределения фазных токов и напряжений в несимметричной схеме без нулевого провода.
2. Исследование распределения фазных токов и напряжений в несимметричной схеме с нулевым проводом.

Полученные результаты моделирования приведены на рисунках 1, 2, 3 и 4 (Косоухов, 2001).

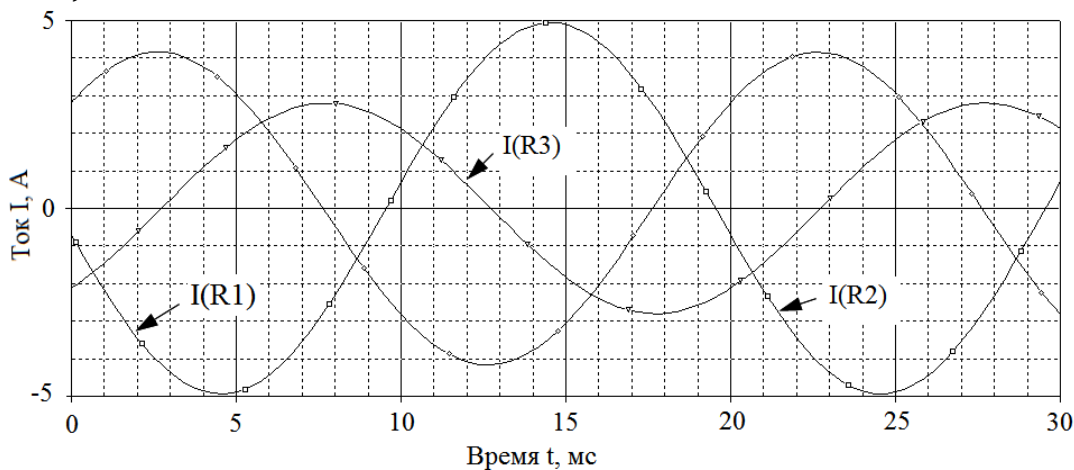


Рис. 1. Осциллограммы фазных токов в трехфазной сети при первом варианте схемы

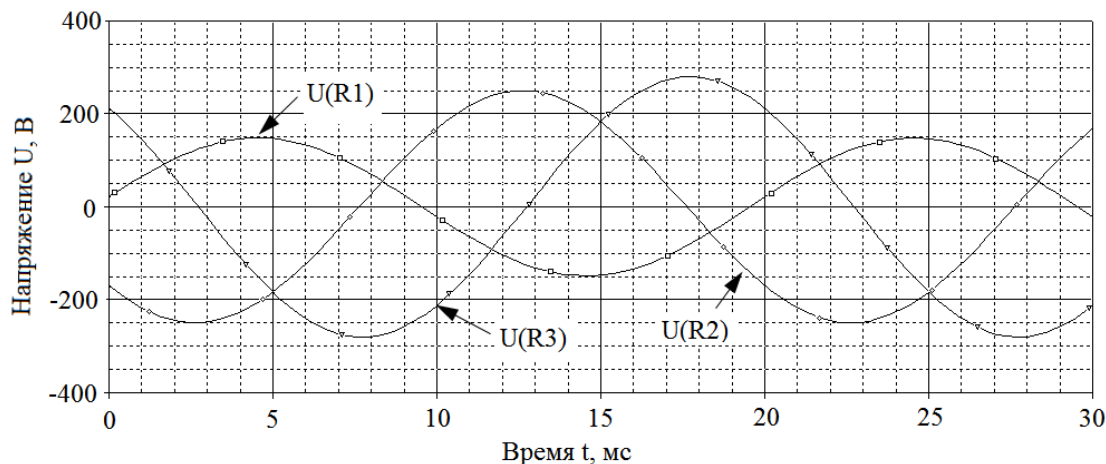


Рис. 2. Осциллограммы фазных напряжений в трехфазной сети при первом варианте схемы

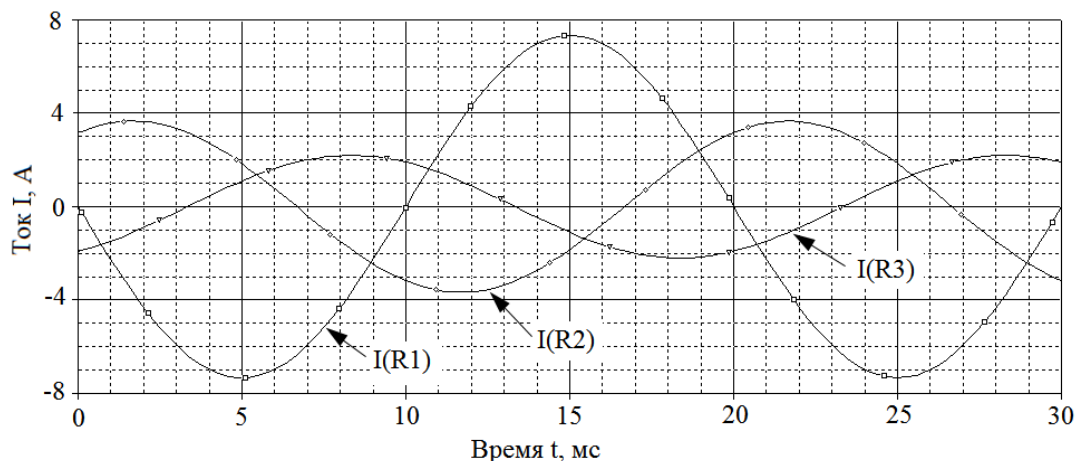


Рис. 3. Осциллограммы фазных токов в трехфазной сети при втором варианте схемы

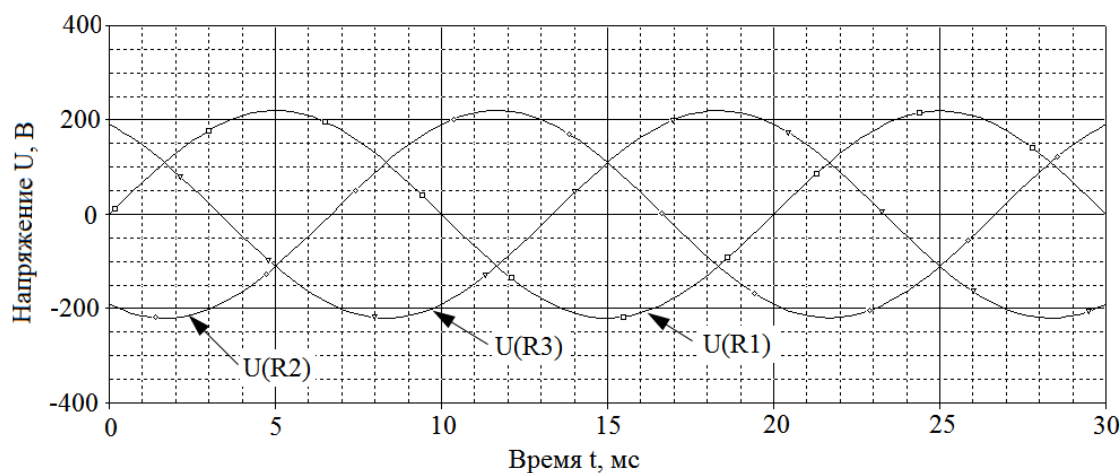


Рис. 4. Осциллограммы напряжений в трехфазной сети при втором варианте схемы

Как показывает моделирование, отклонение фазных напряжений имеют место при обрыве нулевого провода. Причем амплитуда колебаний напряжения различается по фазам в зависимости от величины нагрузок.

При первом варианте наблюдается несимметрия как токов, так и напряжений в сети. В то время, как во втором варианте несимметрия токов остается, однако значения фазных напряжений стали одинаковыми. Это объясняется тем, что присоединение нейтрали к нулевому проводу эквивалентно непосредственному включению каждого из элементов ЭП параллельно к соответствующему источнику напряжения. По этой причине напряжения на них становятся одинаковыми и равными напряжению источника (Косоухов, 2001).

Способы и технические средства снижения несимметрии нагрузок в распределительных сетях как способ снижения потерь электроэнергии. Симметрирование напряжений в сети сводится к компенсации тока и напряжения обратной последовательности.

При постоянном графике нагрузок уменьшения постоянно повторяющейся несимметрии напряжений в сетях возможно достигнуть выравниванием электрических нагрузок фаз с помощью переключения части питающихся потребителей с перегруженной фазы на ту которая ненагруженную.

Рациональное и правильное распределение электрических нагрузок не всегда дает возможность уменьшить коэффициент несимметрии напряжений до необходимого значения (к примеру, когда часть мощных 1-ф ЭП работает по условиям технологии не все время, а также при капитальных и профилактических видах ремонтов). В таких случаях надо использовать специальные симметрирующие устройства (СУ).

Имеется существенное число схем СУ, часть из них выполнена в зависимости от характеристики графика электрических нагрузок.

Для симметрирования 1-ф электрических нагрузок и снижения потерь электроэнергии применяется схема, которая состоит из емкости и индуктивности. Нагрузка и емкость, параллельно с ней включенная, включаются на линейное напряжение. На два остальных линейных напряжения включаются еще и индуктивность и еще одна емкость.

Для симметрии двух- и трехфазных несимметричных электрических нагрузок применяется схема с разными мощностями батарей статических конденсаторов, включенных по схеме «треугольник». Также применяют СУ со специальными трансформаторами (Наумов, 2012).

Поскольку СУ имеет в своем составе батареи конденсаторов (БК), рационально применять данные схемы, те которые одновременно и симметрируют режим и генерируется Q (реактивную мощность) с целью ее компенсации. Устройства для одновременного симметрирования режима, а также компенсации реактивной мощности находятся на стадии разработок.

Снижение потерь и несимметрии в четырехпроводных распределительных сетях 0,4 кВ можно выполнить путем уменьшения токов нулевой последовательности I_0 , а также снижения сопротивления нулевой последовательности Z_0 в элементах распределительной сети.

Уменьшение токов нулевой последовательности I_0 вначале достигается перераспределением электрических нагрузок. Выравнивание электрических нагрузок достигается путем использованием сетей, в которых все или частично трансформаторы работают параллельно по стороне низкого напряжения (сторона НН). Снижение сопротивления нулевой последовательности Z_0 можно просто осуществить для (ВЛ) 0,4 кВ, которые, как правило, строятся в районах с малой плотностью электрических нагрузок. Рациональность уменьшения Z_0 для кабельных линий (КЛ), за счет увеличения сечения нулевого провода, необходима, быть обоснована конкретными технико-экономическими расчетами и доказательствами.

Значительное влияние на не симметрию напряжений и потери электроэнергии в сети оказывает схема соединения обмоток распределительных трансформаторов 6–10/0,4 кВ. Большое число распределительных трансформаторов, которые установлены в сетях, имеют схему звезда — звезда с нулем (У/У₀). Такие распределительные трансформаторы дешевле своих аналогов, но у них значительно больше сопротивление нулевой последовательности Z_0 (Наумов, 2011).

Для оптимизации потерь электроэнергии и снижения несимметрии напряжений, которое вызывается распределительными трансформаторами, целесообразно использовать схемы соединения звезда—зигзаг (У/З) или треугольник— звезда с нулем (Д/У₀). Более благоприятно на оптимизацию потерь электроэнергии и снижения не симметрии применяется схема У/З. Трансформаторы с такой схемой соединением существенно дороже, и изготовление их очень затруднительно и трудоемко. Поэтому их необходимо использовать при большой не симметрии, которая обусловлена не симметрией нагрузок и сопротивление нулевой последовательности Z_0 линий.

Мероприятия по оптимизации потерь электроэнергии и снижению несимметрии напряжения (Наумов, 2011):

1. Равномерное распределение электрической нагрузки по всем трем фазам.
2. Применение СУ (сопротивления в фазах СУ подбирать так, что бы компенсировать ток обратной последовательности, генерируемый электрической нагрузкой как источник искажения).

Нормируемым значением несимметрии есть коэффициент обратной последовательности напряжения, который равен отношению напряжения обратной последовательности U_2 к номинальному линейному напряжению участка сети $U_{ном}$.

При выходе показателей потерь и качества электроэнергии за установленные пределы увеличиваются расход и потери электроэнергии в системах электроснабжения, также снижается уровень надежности работы всего электрооборудования, появляются нарушения технологических процессов и снижается качество продукции и ее выпуск.

Наиболее распространенными источниками не симметрии напряжения и потерь электроэнергии в распределительных сетях и в трехфазных системах электроснабжения есть те потребители электроэнергии, симметричное многофазное исполнение которых нецелесообразно по технико-экономическим соображениям или же невозможно. К такому роду установкам относятся дуговые и индукционные электрические печи, тяговые нагрузки железных дорог, которые выполнены на переменном токе, специальные однофазные электрические нагрузки электросварочные агрегаты, а также установки освещения (Федулов, 2001).

Несимметричные режимы напряжений в электрических сетях имеют место также в аварийных ситуациях – при обрыве фазы или несимметричных коротких замыканиях.

В статье разобраны теоретические аспекты работы трехфазных распределительных сетей в несимметричных режимах, в том числе причины несимметрии и его влияние на составные элементы сети и потери электроэнергии в сетях. Указано, что такие показатели качества электроэнергии, как несимметрия напряжений и отклонение напряжений, не могут быть рассмотрены по отдельности. Проведено схемотехническое моделирование простейшей цепи трехфазного переменного тока в несимметричных режимах в пакете OrCAD, а также влияния нейтрального провода на величину фазных напряжений ЭП. Указаны осциллограммы токов и напряжений в трехфазной сети при неравномерном нагружении фаз. Показано, что несимметрия токов в сети имеет место как при отсутствии нулевого провода, так и при его наличии.

3. Заключение

Снижение и оптимизация потерь электроэнергии как и несимметрия токов и напряжений в сети 0,4 кВ с распределённой нагрузкой не может быть устранено в полной мере только за счет организационными мероприятиями. Для их устранения надо использовать СУ разного конструктивного выполнения. На основе выполненного анализа технических средств и способов симметрирования режимов работы распределительных сетей сделаем заключение, что наиболее эффективным и целесообразным средством и способом является применение шунто симметрирующих устройств, которые имеют минимально возможное сопротивление токов нулевой последовательности. А также произведен анализ изменений показателей качества электрической энергии в действующей распределительных сетях 10-0,4 кВ при использовании СУ, по результатам которого выявлено, что использование симметрирующего устройства позволит повысить качество электроэнергии в 3-6 раз, а потери электроэнергии уменьшить в 2 раза (Дерюшев и др., 2010).

Таким образом, можно сказать, получение данных для расчета показателей и потерь электроэнергии может производиться как путем непосредственных измерений (ГОСТ 13109-97), так и при помощи компьютерного моделирования. Второй способ позволяет рассматривать несимметричные режимы работы трехфазной сети любой сложности еще на стадии проектирования с минимальным количеством допущений, что является очень актуальным с дальнейшим ростом численности населения городов и предприятий, и оптимизация потерь электроэнергии в распределительных сетях.

Литература

ГОСТ 13109-97 – ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Издательство стандартов, 1998. 31 с.

ГОСТ Р 54149-2010 – ГОСТ Р 54149-2010. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии (КЭ) в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартиформ, 2013.

Нормы качества, 1998 – Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / ГОСТ 13109-97. Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск: Изд-во стандартов, 1998. 30 с.

Железко, 2014 – Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2014. 456 с.: ил.

[Кужепов, Гончаров, 2011](#) – *Кужепов С.К., Гончаров С.В.* Городские электрические цепи. Ростов н/Д, 2011. 255 с.

[Сапунов, 2013](#) – *Сапунов М.В.* Несимметрия трехфазной системы напряжений // *Новости электротехники*. 2013. № 5 (11). С. 35-36.

[Дерюшев и др., 2010](#) – *Дерюшев А.А., Свито И.Л., Беляков В.Б.* Применение САПР Orcad для расчета и проектирования электрических схем: учебное пособие по курсу «Основы автоматизированного проектирования электромеханических систем» для студ. спец. «Информационные технологии и управление в технических системах» всех форм обучения. Мн.: БГУИР, 2010. 66 с.: ил.

[Косоухов, 2001](#) – *Косоухов Ф.Д.* Потери мощности и напряжения в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке. // *Техника в сельском хозяйстве*, 2001. № 3. С. 5-8.

[Наумов, 2011](#) – *Наумов И.В.* О качестве электрической энергии и дополнительных потерях мощности в распределительных сетях низкого напряжения России и Германии. // *Электрика*. 2011. № 11. С. 19-22.

[Наумов, 2004](#) – *Наумов И.В.* Способы и технические средства снижения несимметрии токов и потерь электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ. Дисс. канд. техн. наук. Л., 2004. 227 с.

[Наумов, 2012](#) – *Наумов И.В.* Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств. Дисс. доктора техн. наук. Л., 2012. 315 с.

[Федулов, 2001](#) – *Федулов В.И.* Симметрирование как средство снижения потерь электрической энергии в трёхфазных сетях и повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов республики: тез. докл. республ. науч.-тех. конференции. Ташкент, 2001. 88 с.

References

[GOST 13109-97](#) – GOST 13109-97 Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya [Electrical energy. Compatibility of technical means is electromagnetic]. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. M.: Izdatel'stvo standartov, 1998. 31 s.

[GOST R 54149-2010](#) – GOST R 54149-2010. «Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya ["Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic]. Normy kachestva elektricheskoi energii (KE) v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya». M.: Standartinform, 2013.

[Normy kachestva, 1998](#) – Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems]. GOST 13109-97. Mezghos. Sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. Minsk: Izd-vo standartov, 1998. 30 s.

[Zhelezko, 2014](#) – *Zhelezko Yu.S.* (2014). Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Loss of electricity. Reactive power. Quality of electricity: a guide for practical calculations]. M.: ENAS, 456 s.: il.

[Kuzhepov, Goncharov, 2011](#) – *Kuzhepov S.K., Goncharov S.V.* (2011). Gorodskie elektricheskije tsepi [City electric circuits]. Rostov n/D, 255 s.

[Sapunov, 2013](#) – *Sapunov M.V.* (2013). Nesimmetriya trekhfaznoi sistemy napryazhenii [The asymmetry of a three-phase system of voltages]. *Novosti elektrotehniki*. № 5 (11). S. 35-36.

[Deryushev i dr., 2010](#) – *Deryushev A.A., Svitov I.L., Belyakov V.B.* (2010). Primenenie SAPR Orcad dlya rascheta i proektirovaniya elektricheskikh skhem: uchebnoe posobie po kursu «Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya elektromekhanicheskikh sistem» dlya stud. spets. «Informatsionnye tekhnologii i upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh» vsekh form obucheniya [Application CAD Orcad for the calculation and design of electrical circuits: a tutorial on the course "Fundamentals of automated design of electromechanical systems" for stud. specialist. "Information technology and management in technical systems" of all forms of education]. Mн.: BGUIR, 66 s.: il.

[Kosoukhov, 2001](#) – *Kosoukhov F.D.* (2001). Poteri moshchnosti i napryazheniya v sel'skikh setyakh 0,38 kV pri nesimmetrichnoi nagruzke [Loss of power and voltage in rural networks 0.38 kV with unbalanced load]. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*, № 3. S. 5-8.

Naumov, 2011 – Naumov I.V. (2011). O kachestve elektricheskoi energii i dopolnitel'nykh poteryakh moshchnosti v raspredelitel'nykh setyakh nizkogo napryazheniya Rossii i Germanii [On the quality of electrical energy and additional power losses in low voltage distribution networks in Russia and Germany]. *Elektrika*. № 11. S. 19-22.

Naumov, 2004 – Naumov I.V. (2004). Sposoby i tekhnicheskie sredstva snizheniya nesimmetrii tokov i poter' elektricheskoi energii v sel'skikh raspredelitel'nykh setyakh 0,38 kV [Methods and technical means of reducing the asymmetry of currents and losses of electrical energy in rural distribution networks 0.38 kV]. Diss. kand. tekhn. nauk. L., 227 s.

Naumov, 2012 – Naumov I.V. (2012). Snizhenie poter' i povyshenie kachestva elektricheskoi energii v sel'skikh raspredelitel'nykh setyakh 0,38 kV s pomoshch'yu simmetriruyushchikh ustroystv [Reducing losses and improving the quality of electrical energy in rural distribution networks 0.38 kV with the help of balancing devices]. Diss. doktora tekhn. nauk. L., 315 s.

Fedulov, 2001 – Fedulov V.I. (2001). Simmetrirovaniye kak sredstvo snizheniya poter' elektricheskoi energii v trekhfaznykh setyakh i povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya toplivno-energeticheskikh resursov respubliky [Symmetrization as a means of reducing the losses of electrical energy in three-phase networks and increasing the efficiency of the use of fuel and energy resources of the Republic]: tez. dokl. respubl. nauch.-tekh. konferentsii. Tashkent, 88 s.

Оптимизация потерь электроэнергии в распределительных сетях

Р.Р. Садрисламов ^a

^a Удмуртский государственный университет, Российская Федерация

Аннотация. В статье разобраны теоретические аспекты работы трехфазных распределительных сетей в несимметричных режимах, в том числе причины несимметрии и его влияние на составные элементы сети и потери электроэнергии в сетях. Будет указано, что такие показатели качества электроэнергии, как несимметрия напряжений и отклонение напряжений, не могут быть рассмотрены по отдельности. Также будет проведено схемотехническое моделирование простейшей цепи трехфазного переменного тока в несимметричных режимах в пакете OrCAD, а также влияния нейтрального провода на величину фазных напряжений ЭП. Указаны осциллограммы токов и напряжений в трехфазной сети при неравномерном нагружении фаз. Будет показано, что несимметрия токов в сети имеет место как при отсутствии нулевого провода, так и при его наличии.

Ключевые слова: потери энергии, энергоэффективность, оптимизация потерь.