

УДК 621.316.1

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ  
В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ****Дед А.В., Бирюков С.В., Паршукова А.В.***ФГОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, e-mail: ded\_av@mail.ru*

Статья посвящена оценке дополнительных потерь мощности в основных элементах систем электропитания от несимметрии уровня напряжений. Рассмотрены основные способы определения потерь в электрооборудовании при несимметричных режимах работы электрической сети. Представлены зависимости дополнительных потерь мощности в трансформаторах и в линиях электропередачи вызванных неравномерностью загрузки фаз.

**Ключевые слова:** Качество электрической энергии, несимметричная нагрузка, потери мощности**ACCOUNTING ESTIMATES ARE ADDITIONAL POWER LOSSES IN THE  
ELEMENTS ELECTRIC NETWORK****Ded A.V., Birjukov S.V., Parshukova A.V.***Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: ded\_av@mail.ru*

The article is devoted to the evaluation of additional power loss in the basic elements of power supply systems unbalance voltage levels. The basic methods for determining losses in electrical equipment under asymmetric modes mains. The dependences of the additional power losses in transformers and power lines caused by uneven loading phases.

**Keywords:** Power quality, unbalanced load, the power loss

В числе основных задач, установленных указом Президента Российской Федерации №889 от 04.06.2008 «О некоторых мерах по повышению энергетической эффективности российской экономики», стоит снижение к 2020 году энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации не менее чем на 40% по сравнению с 2007 годом [1]. В числе ожидаемых результатов, указанных в стратегических программных документах долгосрочного развития топливного энергетического комплекса Российской Федерации, выделено сокращение потерь электроэнергии при её передаче к 2020 году с величины 11,6% до уровня 8,8%. [2].

Одним из путей достижения этих важных целей является обеспечение рационального и ответственного использования энергии и энергетических ресурсов. Сокращение потерь электроэнергии до требуемого декларативными документами уровня можно добиться, в том числе решая практически вопрос повышения качества электрической энергии в сетях общего назначения.

Дополнительным стимулом к решению задачи эффективной коррекции искаженных режимов электроснабжения являются изменения в нормативно-правовой базе, регламентирующей требования к нормам качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Приказом Федерального агентства по тех-

ническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 22 июля 2013 г. №400-ст с 1 июля 2014 г. введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [3]. Данный стандарт укрепляет требование об обеспечении норм качества электрической энергии, установленных данным стандартом в электрических сетях, находящихся в собственности потребителей. Иными словами теперь сам потребитель должен обеспечить в своих электрических сетях условия, при которых требования стандарта будут выполняться на зажимах электроприемников, при условии выполнения требований к качеству электрической энергии в точке её передачи [4].

В тоже время процесс развития электротехники и внедрение во всех сферах деятельности человека – в промышленности, на транспорте, в быту, нетрадиционных потребителей электроэнергии с несимметричным характером нагрузки приводит к ухудшению качества электрической энергии в системах электроснабжения и как следствие – к снижению эффективности работы, как самих систем электроснабжения, так и потребителей, подключенных к ним [5, 6].

Несимметрия токов и напряжений является одним из факторов увеличивающих потери в сетях и элементах распределения электрической энергии. Экономический ущерб, возникающий в результате воздействия несимметрии токов и напряжений, обусловлен ухудшением энергетических показателей и сокращением срока службы электрооборудования, общим снижением надежности функционирования электрических сетей, увеличением потерь активной мощности и потребления активной и реактивной мощностей.

Устойчивый рост цен на электроэнергию обуславливает дополнительную необходимость работ по уменьшению потерь электроэнергии как процессе ее производства и передачи потребителям, так и в процессе потребления. Поэтому актуальной остается задача оценки дополнительных потерь мощности в основных системах электроснабжения от несимметрии токов и напряжений. Располагая сведениями о величине этих потерь, можно определить способы и методы их снижения: либо ограничиться только организационными мероприятиями, либо применять специальные технические средства, снижающих уровень несимметрии в сети.

Рассмотрим методы оценки дополнительных потерь от несимметрии токов и напряжений в различных элементах систем электроснабжения.

Дополнительные потери в электрических машинах, разделяются на основные и дополнительные. Основные потери возникают в электрических машинах вследствие происходящих в них электромагнитных и механических процессов. К этим потерям относят потери в меди обмоток и в активной стали от основного потока мощности, а также механические потери [7].

Наличие на зажимах асинхронных двигателей даже небольшой несимметрии напряжений, вследствие низкого сопротивления их обратной последовательности, приводит к значительному увеличению потерь активной мощности, что в свою очередь вызывает дополнительный нагрев обмоток.

Следует отметить, что дополнительные потери активной мощности, обусловленные несимметрией напряжений, не зависят от нагрузки двигателя и определяются из выражения:

$$\Delta P_{\text{доп.ад}} = 2,41 k_{\text{ад}} K_{2U}^2 P_H, \quad (1)$$

где  $k_{\text{ад}}$  – безразмерный коэффициент, зависящий от параметров конкретного двигателя (номинальная мощность, потери в меди статора, кратность пускового тока);  $K_{2U}$  – коэффициент несимметрии напряжений;  $P_H$  – номинальная активная мощность двигателя.

В синхронной машине дополнительные потери активной мощности, обусловленные несимметрией, имеют место как в статоре, так и в роторе. Тем не менее, принято пренебрегать потерями в статоре от несимметрии напряжений, так как их величина значительно меньше потерь в обмотке ротора. Поэтому дополнительные потери мощности, могут быть определены в зависимости от коэффициента несимметрии напряжений по формуле:

$$\Delta P_{\text{доп.см}} = k_{\text{сд}} K_{2U}^2, \quad (2)$$

где  $k_{\text{сд}}$  – коэффициент, зависящий от типа синхронной машины;  $K_{2U}$  – коэффициент несимметрии напряжений.

Коэффициент  $k_{\text{сд}}$  принимает следующие значения: для турбогенераторов – 1,856; для гидрогенераторов и синхронных двигателей с успокоительной обмоткой (без успокоительной обмотки) – 0,681 (0,273); для синхронных компенсаторов – 1,31 [8].

Дополнительные потери активной мощности от несимметрии режима в силовых трансформаторах вызваны протеканием в них токов обратной последовательности. Их можно определить по следующей формуле

$$\Delta P_{\text{доп.тр}} = K_{2U}^2 \left( \Delta P_{\text{х.х.}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{u_{\text{кз}}^2} \right), \quad (3)$$

где  $\Delta P_{\text{х.х.}}$  – потери холостого хода;  $\Delta P_{\text{кз}}$  – потери короткого замыкания;  $U_{\text{кз}}$  – напряжение короткого замыкания.

Первое слагаемое в формуле 3 на порядок меньше второго и при практических расчетах его рекомендуют не учитывать [8].

На рис. 1, в качестве примера, представлены зависимости дополнительных потерь мощности силового трансформатора от номинальной мощности и уровня коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Значения рассчитывались для стандартного ряда номинальных мощностей трансформаторов  $S_H = 100, 160, 250, 400, 630$  кВА. Значения коэффициента несимметрии  $K_{2U}$  принимались равными в диапазоне от 0 до 5%.

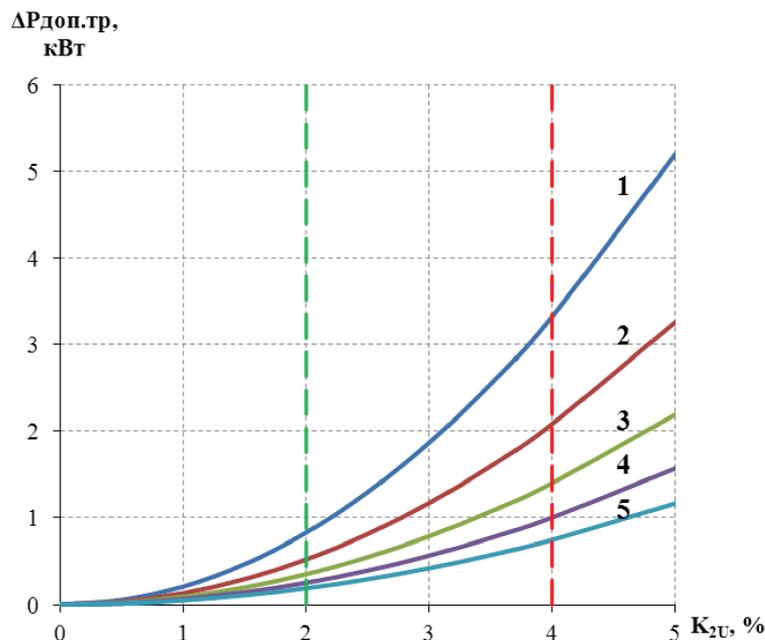


Рис. 1. Зависимость дополнительных потерь мощности трансформаторов, от коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности:  
 1 –  $S_{ТНОМ}=630$  кВА; 2 –  $S_{ТНОМ}=400$  кВА; 3 –  $S_{ТНОМ}=250$  кВА; 4 –  $S_{ТНОМ}=160$  кВА; 5 –  $S_{ТНОМ}=100$  кВА

Согласно действующих нормативных актов значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности  $K_{U2}$  в точке передачи электрической энергии, не должно превышать 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю, и не должно превышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Из рис. 1 видно, что при достижении коэффициентом несимметрии предельно рекомендуемого значения 4%, дополнительные потери, относительно нормально допустимого уровня несимметрии 2%, увеличиваются в 4 раза.

Увеличение потерь в силовых конденсаторах, вызванное искажением питающего напряжения, составляет незначительную часть в суммарных дополнительных потерях, возникающих в электрических сетях и у потребителей. Тем не менее, эти потери могут приводить к существенному возрастанию температуры конденсаторов и сокращению их срока службы.

Дополнительные потери в конденсаторной установке от несимметрии определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{доп.ку}} = K_{2U}^2 Q_H \text{tg}\delta, \quad (4)$$

где  $Q_H$  – номинальная реактивная мощность конденсаторной установки;  $\text{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

В линиях высокого напряжения (без нулевого провода) при неучете токов нулевой последовательности дополнительные потери, вызванные только токами обратной последовательности равны:

$$\Delta P_{\text{доп.лЭП}} = \Delta P_{\text{лЭП}} K_{2I}^2, \quad (5)$$

где  $\Delta P_{\text{лЭП}}$  – потери в линии электропередачи в симметричном режиме;  $K_{2I}$  – коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности.

При несимметричной нагрузке линий электропередач 0,38 кВ дополнительное увеличение потерь мощности по сравнению с симметричным режимом может быть оценено с помощью коэффициента  $K_{\text{НЕР}}$  учитывающего неравномерность нагрузки фаз:

$$\Delta P_{\text{доп.лЭП}} = \Delta P_{\text{лЭП}} K_{\text{НЕР}}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{НЕР}} = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} \left( 1 + 1,5 \frac{r_{\text{НТ}}}{r_{\Phi}} \right) - 1,5 \frac{r_{\text{НТ}}}{r_{\Phi}}$ ;

$r_{\text{НТ}}, r_{\Phi}$  – сопротивления нейтрального и фазного проводов;  $I_A, I_B, I_C$  – измеренные токи фаз.

Для сети с изолированной нейтралью выражение для определения  $K_{\text{НЕР}}$  принимает вид:

$$K_{\text{НЕР}} = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3I_{CP}^2}. \quad (7)$$

При увеличении коэффициента неравномерности токов фаз потери мощности увеличиваются (рис. 2).

Расчет дополнительных потерь активной мощности, вызванных отклонением показателей качества электрической энергии

от нормативных параметров, представляют особый интерес [5, 6, 9], так эти дополнительные потери должны учитываться при формировании общего баланса предприятия, в том числе и при утверждении тарифа на передачу электрической энергии.

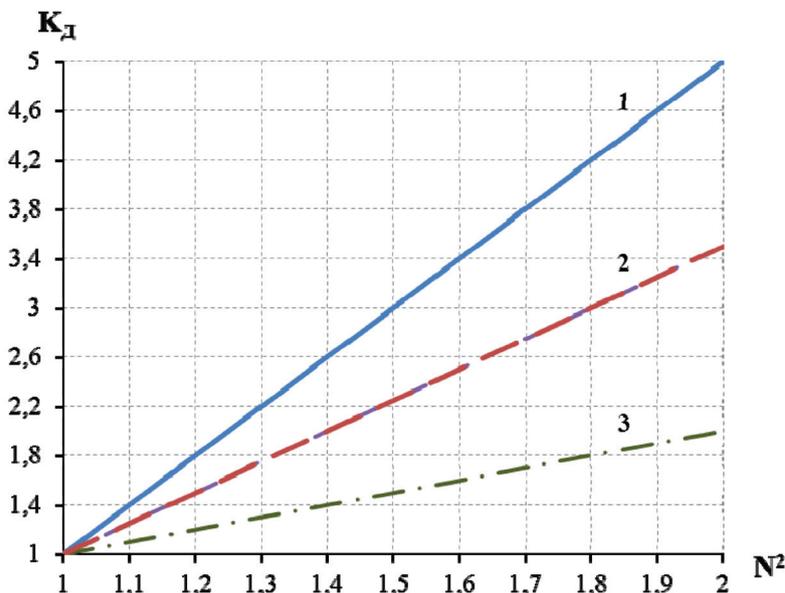


Рис. 2. Зависимость коэффициента дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,4 кВ от коэффициента неравномерности нагрузки фаз линии:  
1 – четырехпроводная с нейтральным проводом ( $R_{HT}=2R_\phi$ ); 2 – четырехпроводная с нейтральным проводом ( $R_{HT}=R_\phi$ ); 3 – трехпроводная без нейтрального провода

Значения дополнительных потерь мощности в отдельных элементах распределительной сети, возникающих в результате воздействия несимметрии, позволяет оценить их общую величину и определить экономический ущерб, обусловленный снижением качества электрической энергии. Все это необходимо для предварительных расчетов экономической целесообразности применения мероприятий по повышению качества электрической энергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 г. №889 URL: <http://www.rg.ru/2008/06/07/ukaz-dok.html> (дата обращения: 10.10.14).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. №321. URL: <http://www.rg.ru/2014/04/24/energetika-site-dok.html> (дата обращения: 10.10.14).
3. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 22 июля 2013 г. №400-ст «О введении в действие межгосударственного

стандарта». URL: <http://docs.cntd.ru/document/499061116> (дата обращения: 10.10.14).

4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. – 10 с.

5. Дед А.В. Дополнительные потери мощности в электрических сетях при несимметричной нагрузке / А.В. Дед [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – №1 (117). – С. 157-158.

6. Долингер С.Ю. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаевич, В.Н. Горюнов и др. // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 178-183.

7. Карташев И.И. Управление качеством электроэнергии. / И.И. Карташев, Н.В. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Шарова Ю. В. – М.: МЭИ, 2006. – 320 с.

8. Шидловский А.Н. Повышение качества энергии в электрических сетях. / А.Н. Шидловский, В.Г. Кузнецов – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.

9. Дед А.В. Основные методы определения потерь электроэнергии при несимметричных режимах работы электроприемников / А.В. Дед, М.Ю. Денисенко, Е.С. Сухов // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2012, – № 6-1. – С. 46-48.