

## **РАСЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Дед А.В.<sup>1</sup>, С.В. Бирюков С. В.<sup>1</sup>, Паршукова А. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия  
(644050, Омск, пр.Мира, 11) e-mail: ded\_av@mail.ru

---

Данная статья посвящена анализу способов оценки дополнительных потерь мощности в основных элементах систем электроснабжения, возникающих при несимметрии уровня напряжений. В статье описана актуальность снижения потерь электрической энергии. Также описаны отрицательные последствия при снижении качества электрической энергии. Показана необходимость учета дополнительных потерь электрической энергии от несимметрии токов и напряжений. Проанализированы основные способы определения потерь в электрооборудовании при несимметричных режимах работы электрической сети. Представлены зависимости дополнительных потерь мощности трансформаторов серии ТМ, от коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. Показано, что значения величин дополнительных потерь мощности в отдельных элементах распределительной сети, в условиях несимметричного режима работы, необходимы для оценки суммарной доли вышеназванных потерь в общей величине потерь и определения экономического ущерба, обусловленного снижением показателей качества электрической энергии.

---

Ключевые слова: Качество электрической энергии, несимметричная нагрузка, потери мощности

## **CALCULATION OF ADDITIONAL POWER LOSSES FROM EXPOSURE UNBALANCED VOLTAGES AND CURRENTS CELL ELECTRIC NETWORK**

Ded A.V.<sup>1</sup>, Birjukov S. V.<sup>1</sup>, Parshukova A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia  
(644050, Omsk, st. Prospect Mira, 11), e-mail: ded\_av@mail.ru

---

This article analyzes the ways to assess the additional power loss in the basic elements of power supply systems, arising from the asymmetry of the stress level. The article describes the relevance of reduction of electricity losses. Also described the negative effects while reducing the quality of electric energy. The necessity of taking into account the additional losses of energy from the electric current and voltage unbalance. Analyzed the main methods for determining losses in electrical equipment under asymmetric modes mains. The dependences of the additional power loss transformers TM series, the coefficient of voltage unbalance in the reverse order. It is shown that the values of additional power losses in the individual elements of the distribution network, in terms of an asymmetric mode, is needed to assess the total proportion of the above-mentioned losses in the total value of losses and determine the economic damage caused by a decrease in the quality of electric energy.

---

Keywords: Power quality, unbalanced load, the power loss

Уровень энергоемкости производства важнейших отечественных промышленных продуктов выше среднемировых в 1,2 - 2 раза и выше лучших мировых образцов в 1,5 – 4

раза. Кроме того существует проблема низкой конкурентоспособности российской промышленности из-за низкой энергетической эффективности. Поэтому при приближении внутренних цен на энергетические ресурсы к мировым российская промышленность может выжить в конкурентной борьбе только при условии значительного повышения энергетической эффективности производства [5].

Снижение к 2020 году энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации не менее чем на 40% по сравнению с 2007 годом, в том числе за счет сокращения потерь электроэнергии при её передаче к 2020 году с величины 11,6% до уровня 8,8%. – это основная задача, определенная указом Президента Российской Федерации №889 от 04.06.2008 «О некоторых мерах по повышению энергетической эффективности российской экономики» и программой стратегического топливного энергетического комплекса Российской Федерации [6].

Способом достижения этих немаловажных целей является обеспечение рационального и ответственного использования энергетических ресурсов и энергии. Сокращение потерь электроэнергии до уровня установленного нормативными документами можно добиться, за счет повышения качества электрической энергии в сетях общего назначения.

Качество электрической энергии в настоящее время стало привычным и ясным понятием в области снабжения потребителей электрической энергии. Увеличение количества и повышение установленной мощности электроприемников с нелинейным и несимметричным характером нагрузки на транспорте, в быту, развитие технологических установок в промышленности 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. В результате электрооборудование, рассчитанное на работу в электрической системе при определенном уровне характеристик электрической энергии, во многих случаях эксплуатируется в неэффективных режимах, что приводит к ряду отрицательных последствий [7]:

- 1) увеличение потерь во всех элементах системы;
- 2) рост потребления электроэнергии;
- 3) рост требуемой мощности электрооборудования;
- 4) сокращение срока службы (выход из строя) электрооборудования;
- 5) увеличение капитальных вложений в системы электроснабжения;
- 6) ложные срабатывания релейной защиты и автоматики;
- 7) сбои в работе электронных устройств управления и вычислительной техники;
- 8) помехи в линиях связи;
- 9) нарушение нормальной работы производства, брак продукции.

Одним из факторов увеличивающих потери в сетях и элементах распределения электрической энергии является несимметрия токов и напряжений.

Экономический ущерб от снижения качества электроэнергии, возникающий в результате воздействия несимметрии токов и напряжении, 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.

В сетях промышленных предприятий содержится большое количество несимметричных и нелинейных нагрузок, и потребителей чувствительных к искажениям уровня напряжений. При снижении качества напряжения ухудшаются условия работы асинхронных и синхронных двигателей, силовых трансформаторов, конденсаторных батарей, систем освещения и другого электрооборудования, что приводит к увеличению потерь активной мощности.

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

К потребителям весьма чувствительным к отклонению качества напряжения относятся асинхронные и синхронные двигатели, составляющих основную долю (более 50%) в общем составе нагрузки промышленных предприятий [7]. 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 [4].

Даже небольшой уровень несимметрии напряжений на зажимах асинхронных двигателей, вследствие низкого сопротивления их обратной последовательности, приводит к значительному увеличению потерь активной мощности, что в свою очередь вызывает дополнительный нагрев обмоток. Дополнительные потери в электрических машинах, вызванные несимметрией напряжений можно определить по упрощенной формуле:

$$\Delta P = k' K_{2U}^2 P_H, \quad (1)$$

где  $k'$  – коэффициент, зависящий от типа электрической машины;

$K_{2U}$  – коэффициент несимметрии напряжений;

$P_H$  – номинальная активная мощность двигателя.

Для асинхронных двигателей коэффициент  $k'$  рассчитывается следующим образом:

$$k'_{АД} = 2,41 k_{АД}, \quad (2)$$

где  $k_{АД}$  – безразмерный коэффициент, зависящий от параметров конкретного двигателя (номинальная мощность, потери в меди статора, кратность пускового тока).

Значение коэффициента  $k_{АД}$  обратно пропорционально величине номинальной мощности асинхронного двигателя. Средние значения  $k_{АД}$  для различных отраслей промышленности изменяются от 1,07 до 2,91, а для всей промышленности в целом рекомендуется принимать  $k_{АД} = 1.85$  [7].

Следует отметить, что дополнительные потери активной мощности, обусловленные несимметрией напряжений, не зависят от нагрузки двигателя и определяются из выражения, с учетом (1,2):

$$\Delta P_{\text{доп.АД}} = 2,41k_{АД}K_{2U}^2P_{Н}, \quad (3)$$

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:

$$\Delta P_{\text{доп.СМ}} = k_{СД}K_{2U}^2P_{Н}, \quad (4)$$

где  $k_{СД}$  – коэффициент, зависящий от типа синхронной машины;

$K_{2U}$  – коэффициент несимметрии напряжений;

$P_{Н}$  – номинальная активная мощность двигателя.

Коэффициент  $k_{СД}$  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 [7].

Коэффициенты  $k_{АД}$  и  $k_{СД}$  целесообразно применять для расчета результирующих дополнительных потерь активной мощности в системах с большим количеством электрических машин.

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

$$\Delta P_{\text{доп.ТР}} = K_{2U}^2 \left( \Delta P_{\text{х.х.}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{u_{\text{кз}}^2} \right) \quad (5)$$

где  $\Delta P_{\text{х.х.}}$  – потери холостого хода;

$\Delta P_{\text{кз}}$  – потери короткого замыкания;

$U_{\text{кз}}$  – напряжение короткого замыкания.

На рисунке 1, представлены зависимости дополнительных потерь мощности силовых трансформаторов с высшим напряжением 6 (10) кВ типа ТМ от номинальной мощности и уровня коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. Значения рассчитывались для стандартного ряда трансформаторов с номинальными мощностями  $S_{Н}$

от 25 до 630 кВА. Значения коэффициента несимметрии  $K_{2U}$  принимались равными в диапазоне от 0 до 5%.

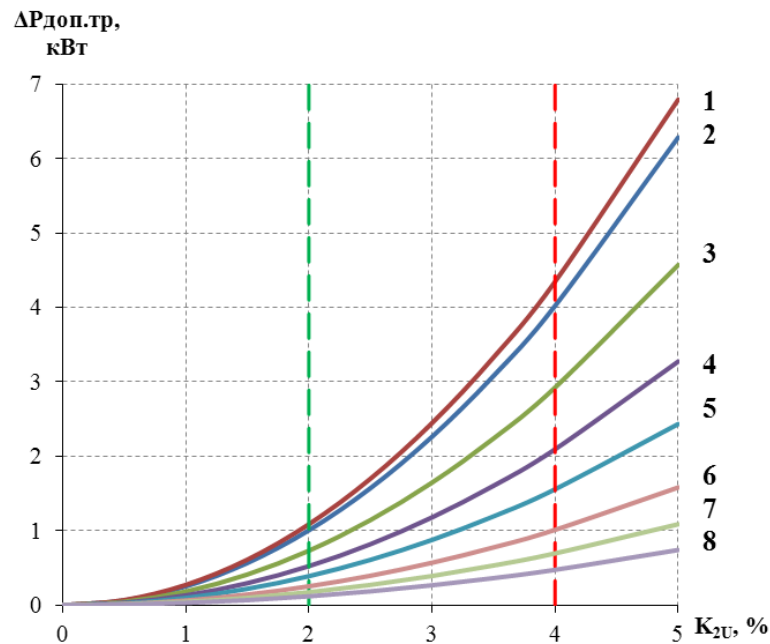


Рис. 1. Зависимость дополнительных потерь мощности трансформаторов серии ТМ, от коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности: 1 –  $S_{Т.НОМ}=630$  кВА; 2 –  $S_{Т.НОМ}=400$  кВА; 3 –  $S_{Т.НОМ}=250$  кВА; 4 –  $S_{Т.НОМ}=160$  кВА; 5 –  $S_{Т.НОМ}=100$  кВА; 6 –  $S_{Т.НОМ}=63$  кВА; 7 –  $S_{Т.НОМ}=40$  кВА; 8 –  $S_{Т.НОМ}=25$  кВА.

Из зависимостей на рисунке 1 видно, что при величине коэффициента несимметрии в 4% (предельно допустимый уровень) дополнительные потери, относительно нормально допустимого уровня несимметрии равного 2%, увеличиваются в 4 раза.

В случае отсутствия возможности определения точных паспортных характеристик трансформаторов, либо расчета для группы однородных трансформаторов, дополнительные потери активной мощности вычисляются по выражению:

$$\Delta P_{\text{доп.тр}} = k'_{\text{тр}} K_{2U}^2 S_{\text{н}}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{н}}$  – номинальная полная мощность силового трансформатора;

$k'_{\text{тр}}$  – коэффициент, зависящий от мощности и назначения трансформатора.

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 напряжений определяется по формуле:

$$\Delta P_{\text{доп.ку}} = K_{2U}^2 Q_H \operatorname{tg} \delta, \quad (7)$$

где  $Q_H$  – номинальная реактивная мощность конденсаторной установки;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Для батарей конденсаторов, при отсутствии данных о величине диэлектрических потерь, допустимо использовать коэффициент  $k'_{\text{ку}}$ , значение которого, исходя из обработанных данных о работе групп однотипных элементов, рекомендуется принимать  $k'_{\text{ку}} = 0.003$  [7]. Следовательно, выражение (7) примет следующий вид:

$$\Delta P_{\text{доп.ку}} = k'_{\text{ку}} K_{2U}^2 Q_H, \quad (8)$$

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

$$\Delta P_{\text{доп.лэп}} = \Delta P_{\text{лэп}} K_{2I}^2, \quad (9)$$

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  $K_{\text{нёр}}$ , учитывающего неравномерность нагрузки фаз [1]:

$$\Delta P_{\text{доп.лэп}} = \Delta P_{\text{лэп}} K_{\text{нёр}}, \quad (10)$$

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

$r_{\text{нт}}$ ,  $r_{\text{ф}}$  – сопротивления нейтрального и фазного проводов;

$I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  – измеренные токи фаз.

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

$$K_{\text{нёр}} = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3I_{\text{ср}}^2}. \quad (11)$$

Расчет дополнительных потерь активной мощности, вызванных отклонением показателей качества электрической энергии от нормативных параметров, представляют особый интерес [1 – 3]. Значения величин дополнительных потерь мощности в отдельных элементах распределительной сети, в условиях несимметричного режима работы, необходимы для оценки суммарной доли вышеназванных потерь в общей величине потерь и определения экономического ущерба, обусловленного снижением показателей качества электрической энергии. Без этих значений затруднительно произвести предварительные расчеты экономической целесообразности применения мероприятий по повышению качества электрической энергии.

## Список литературы.

1. 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.
2. 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.
3. Долингер С.Ю. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаревич, В.Н. Горюнов и др. // Омский научный вестник. –2013. -№ 2 (120). – С. 178-183
4. 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.
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. №321. URL: <http://www.rg.ru/2014/04/24/energetika-site-dok.html>
6. Указ Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 г. №889 URL: <http://www.rg.ru/2008/06/07/ukaz-dok.html>
7. Шидловский А.Н. Повышение качества энергии в электрических сетях. / А.Н. Шидловский, В.Г. Кузнецов – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.

### **Рецензент Харламов Виктор Васильевич.**

**Полные сведения о рецензенте:** Харламов Виктор Васильевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС), Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35. Тел (3812) 31-34-46.

### **Рецензент Черемисин Василий Титович**

**Полные сведения о рецензенте:** Черемисин Василий Титович, д. т. н., профессор, директор Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте (НИИЭ ОмГУПС), заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС), Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35, тел. (3812) 31-13-44.