

УДК 621.316.11

ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ОТ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Дед А.В., Паршукова А.В., Халитов Н.А.

ФГОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, e-mail: ded_av@mail.ru

Статья посвящена основным способам оценки дополнительных потерь мощности в базисных элементах систем электропотребления и электроснабжения, вызванных наличием несимметрии напряжений и токов. Проведен анализ существующих способов определения дополнительных потерь мощности в основных элементах систем электроснабжения. Показано, что наличие в сети амплитудной и угловой несимметрии приводит к увеличению дополнительных потерь мощности по сравнению с симметричным режимом. В заключение представлена блок-схема алгоритма определения суммарных дополнительных потерь мощности и интерфейс программы для расчета потерь при длительных несимметричных режимах работы систем электроснабжения.

Ключевые слова: несимметричная нагрузка, потери мощности, несимметрия токов и напряжений

ASSESSMENT OF ADDITIONAL LOSSES OF POWER FROM ASYMMETRY OF TENSION AND CURRENTS IN ELEMENTS OF SYSTEMS OF POWER SUPPLY

Ded A.V., Parshukova A.V., Halitov A.V.

Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: ded_av@mail.ru

Article is devoted to the main ways of an assessment of additional losses of power in the basic elements of systems of a power consumption and power supply caused by existence of asymmetry of tension and currents. The analysis of the existing ways of definition of additional losses of power in basic elements of systems of power supply is carried out. It is shown that existence in a network of amplitude and angular asymmetry leads to increase in additional losses of power in comparison with the symmetric mode. The flowchart of algorithm of definition of total additional losses of power and the interface of the program for calculation of losses at long asymmetrical working hours of systems of power supply is in summary submitted.

Keywords: asymmetrical loading, losses of power, asymmetry of currents and tension

Как известно, причиной ухудшающей значения показателей качества электрической энергии и приводящей к возрастанию потерь и элементах систем распределения и потребления электрической энергии является наличие режимов длительной несимметрии токов и напряжений [1 – 4, 7, 9].

В виду важности реализации вопроса о снижении к 2020 году общей величины потерь электроэнергии при её передаче по электрическим сетям до уровня 8,8% [6], актуальной остается задача оценки возникающих потерь мощности в основных компонентах электроснабжающих систем при наличии несимметрии токов и напряжений.

Имея, на основании данных анализа показателей качества электрической энергии, сведения о величине данных потерь можно произвести выбор и реализовать необходимые мероприятия (организационные, технические) по оптимизации режимов энергопотребления.

Рассмотрим основные способы оценки дополнительных потерь мощности в базисных элементах систем электропотребления и электроснабжения, обусловленных наличием несимметрии токов и напряжений.

Линии электропередач, являются основными передающим звеном в структуре электроэнергетических систем. В линиях высокого напряжения, когда нулевой про-

вод и ток нулевой последовательности отсутствует или не учитывается в силу своего малого значения $I_0 = (0,1 \div 0,2) I_2$, дополнительные потери активной мощности вызываются только токами обратной последовательности и определяются по выражению:

$$\Delta P_{\text{доп.лэп}} = \Delta P_{\text{лэп}} K_{2l}^2, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{лэп}}$ – потери мощности в линии электропередачи при симметричном режиме работы;
 K_{2l} – коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности.

В симметричном режиме потери в линиях электропередач определяются из соотношения:

$$\Delta P_{\text{лэп}} = 3 I_1^2 r_{\Phi}, \quad (2)$$

где I_1 – ток симметричного режима (ток прямой последовательности);
 r_{Φ} – сопротивление фазного провода.

Существенная доля потерь при передаче электрической энергии приходится на самые распространенные линии напряжением 0,38 кВ [8].

Дополнительные потери при несимметричной нагрузке для данных линий рекомендуется учитывать с помощью коэффициента $K_{\text{нпр}}$, учитывающего неравномерность нагрузки фаз [4, 5, 7]:

$$K_{\text{нр}} = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} \left(1 + 1,5 \frac{R_{\text{н}}}{R_{\Phi}} \right) - 1,5 \frac{r_{\text{нт}}}{r_{\Phi}} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3I_{\text{ср}}^2} \left(1 + 1,5 \frac{R_{\text{н}}}{R_{\Phi}} \right) - 1,5 \frac{R_{\text{н}}}{R_{\Phi}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{н}}$, R_{Φ} – сопротивления нейтрального и фазного проводов;

I_A , I_B , I_C – измеренные токи фаз;

$I_{\text{ср}}$ – среднее значение измеренных токов фаз.

Для сетей с изолированной нейтралью выражение (3) принимает вид:

$$K_{\text{нр}} = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3I_{\text{ср}}^2}. \quad (4)$$

Таким образом, дополнительное увеличение значения потерь мощности в сопоставлении с симметричным режимом может быть определено с помощью следующего выражения:

$$\Delta P_{\text{доп.лэп}} = \Delta P_{\text{лэп}} K_{\text{нр}}. \quad (5)$$

Как следует из выражений (3) и (4), рассчитанные с их помощью значения потерь мощности, получаются достоверными только в случае наличия амплитудной несимметрии, то есть когда углы сдвига фаз токов по отношению к своим напряжениям одинаковы.

Наличие в сети как амплитудной, так и угловой несимметрии для оценки увеличения дополнительных потерь по сравнению с симметричным режимом можно учесть с помощью коэффициента $K_{\text{нес}}$ [8]:

$$K_{\text{нес}} = 1 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\Phi}} \right), \quad (6)$$

где K_{2I} , K_{0I} – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности.

И соответственно, выражение (5) примет следующий вид

$$\Delta P_{\text{доп.лэп}} = \Delta P_{\text{лэп}} K_{\text{нес}}. \quad (7)$$

Как видно из выражений (1), (5), (7) при увеличении уровня несимметрии токов и напряжений дополнительные потери мощности увеличиваются.

Возникающие в электрических машинах дополнительные потери, принято подразделять на основные и дополнительные.

Потери, которые проявляются в электрических машинах из-за протекающих в них электромагнитных процессов, такие как потери от основного потока мощности в меди обмоток и в стали относят к основным потерям. К ним же причисляют и относят механические потери – потери от трения в подшипниках, щетках и вентиляционные [9].

Наличие на зажимах асинхронных двигателей несимметрии напряжений, вследствие малого сопротивления их обратной последовательности, влечет за собой увеличение потерь активной мощности и дополнительный нагрев обмоток.

Дополнительные потери активной мощности в электрической машине, обусловленные несимметрией напряжений, не зависят от ее нагрузки [9] и определяются из выражения:

$$\Delta P_{\text{доп.ад}} = 2,41 k_{\text{ад}} K_{2U}^2 P_{\text{н}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{ад}}$ – коэффициент, учитывающий параметры конкретного двигателя (номинальная мощность, потери в меди статора, кратность пускового тока);

K_{2U}^2 – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;

$P_{\text{н}}$ – номинальная активная мощность двигателя.

Согласно [9] значение коэффициента $k_{\text{ад}}$ для промышленной нагрузки в целом рекомендуется принимать равным 1,85.

В синхронных машинах дополнительные потери активной мощности, вызванные несимметрией режима работы, наличествуют и в статоре и в роторе одновременно.

Вместе с тем, величина потерь в статоре от несимметрии напряжений значительно меньше потерь в обмотке ротора, в связи с чем рекомендуется ими пренебрегать [8].

Поэтому дополнительные потери мощности, определяются в зависимости от коэффициента несимметрии напряжений по формуле:

$$\Delta P_{\text{доп.см}} = k_{\text{сд}} K_{2U}^2 P_{\text{н}}, \quad (9)$$

где $k_{\text{сд}}$ – коэффициент, определяемый в зависимости от типа синхронной машины;

K_{2U}^2 – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;

$P_{\text{н}}$ – номинальная активная мощность двигателя.

Коэффициент $k_{\text{сд}}$ рекомендуется определять следующим образом: для турбогенераторов – 1,86; для гидрогенераторов и синхронных двигателей – 0,68; для синхронных компенсаторов – 1,5 [4].

Силовые трансформаторы представляют собой статические устройства, в которых порядок ротации фаз не изменяет характер процессов протекающих в них. Несимметрия входных напряжений трансформатора, как и его нагрузочных токов, приводит к

появлению несимметрии его выходных напряжений [9], обусловленных составляющими соответственно обратной и нулевой последовательности.

Особенно чувствительны к несимметрии нагрузок трансформаторы с соединением обмоток по схеме звезда – звезда с нулем, которые имеют большое сопротивление нулевой последовательности, что вызывает возникновение неуравновешенной системы их выходных напряжений [9].

При длительном несимметричном режиме работы в силовых трансформаторах, вследствие протекания токов обратной последовательности, возникают дополнительные потери мощности, которые могут быть определены по следующей формуле:

$$\Delta P_{\text{доп.тр}} = K_{2U}^2 \left(\Delta P_{\text{х.х.}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{u_{\text{кз}}^2} \right), \quad (10)$$

где K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности; $\Delta P_{\text{х.х.}}$ – потери в режиме холостого хода; $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери в режиме короткого замыкания; $U_{\text{кз}}$ – напряжение короткого замыкания.

В случае недостатка сведений о паспортных характеристиках трансформатора, либо в случае расчета значений дополнительных потерь мощности для группы однородных трансформаторов, последние допускается вычислять по выражению [9]:

$$\Delta P_{\text{доп.тр}} = k'_{\text{тр}} K_{2U}^2 S_H, \quad (11)$$

где S_H – номинальная полная мощность силового трансформатора; $k'_{\text{тр}}$ – коэффициент, определяемый в соответствии с мощностью и назначением трансформатора.

Расчетное значение $k'_{\text{тр}}$, определенное для усредненных параметров стандартного оборудования, в частности для трансформаторов 6–10 кВ рекомендуется принимать $k'_{\text{тр}} = 2,67$, для трансформаторов 35–220 кВ $k'_{\text{тр}} = 0,5$ [9].

В батареях статических силовых конденсаторов, увеличение потерь мощности, вызванное искажением симметрии питающего напряжения, составляет достаточно малую часть в общей величине дополнительных потерь, возникающих в электрических сетях и у потребителей.

Тем не менее, эти потери могут приводить к серьезному росту температуры конденсаторов и, следовательно, уменьшению срока их службы.

Дополнительные потери в конденсаторных установках вызванные несимметричной нагрузкой, определяется из выражения [9]:

$$\Delta P_{\text{доп.ку}} = K_{2U}^2 Q_H \text{tg} \delta = K_{\text{ку}} K_{2U}^2 Q_H, \quad (12)$$

где Q_H – номинальное значение реактивной мощности конденсаторной установки; $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; $K_{\text{ку}}$ – поправочный коэффициент, рекомендуемое значение – 0,003 [9].

Для расчета экономического ущерба, вызванного снижением качества электрической энергии, вследствие наличия несимметрии токов и напряжений, необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$\Xi = \Delta W_{\text{доп}} T, \quad (13)$$

где $\Delta W_{\text{доп}}$ – дополнительные потери электрической энергии за необходимый временной интервал;

T – стоимость электрической энергии в денежном эквиваленте за 1 кВт·ч.

Величина дополнительных потерь энергии определяется следующим образом:

$$\Delta W_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{доп}} \sum t, \quad (14)$$

где $\Delta P_{\text{доп}} \sum$ – суммарные дополнительные потери мощности в элементах рассматриваемой энергетической системы;

t – временной интервал, за который требуется найти величину потерь энергии (смена, сутки, месяц, год).

Определить суммарную величину дополнительных потерь мощности во всех элементах рассматриваемой системы электроснабжения можно с помощью уравнения

$$P_{\text{доп}} \sum = \Delta P_{\text{доп.тр}} \sum + \Delta P_{\text{доп.лэп}} \sum + \Delta P_{\text{доп.см}} \sum + \Delta P_{\text{доп.ад}} \sum + \Delta P_{\text{доп.ку}} \sum. \quad (15)$$

Определение экономического ущерба носит приближенный характер и направлено в первую очередь на предварительный расчет экономической целесообразности применения тех или иных мероприятий по снижению уровня несимметрии токов и напряжений.

Проведенный обзор способов расчета дополнительных потерь мощности и приведенные выше формулы (1) – (15) стали основой для разработки алгоритма и создания программы для расчета в элементах систем электроснабжения значений дополнительных потерь мощности, обусловленных наличием несимметричных токов и напряжений. Алгоритм расчета реализован при помощи языка программирования Object Pascal в среде Delphi. Схема разработанного алгоритма и окно интерфейса программа для оценки дополнительных потерь мощности на основе экспериментальных данных представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

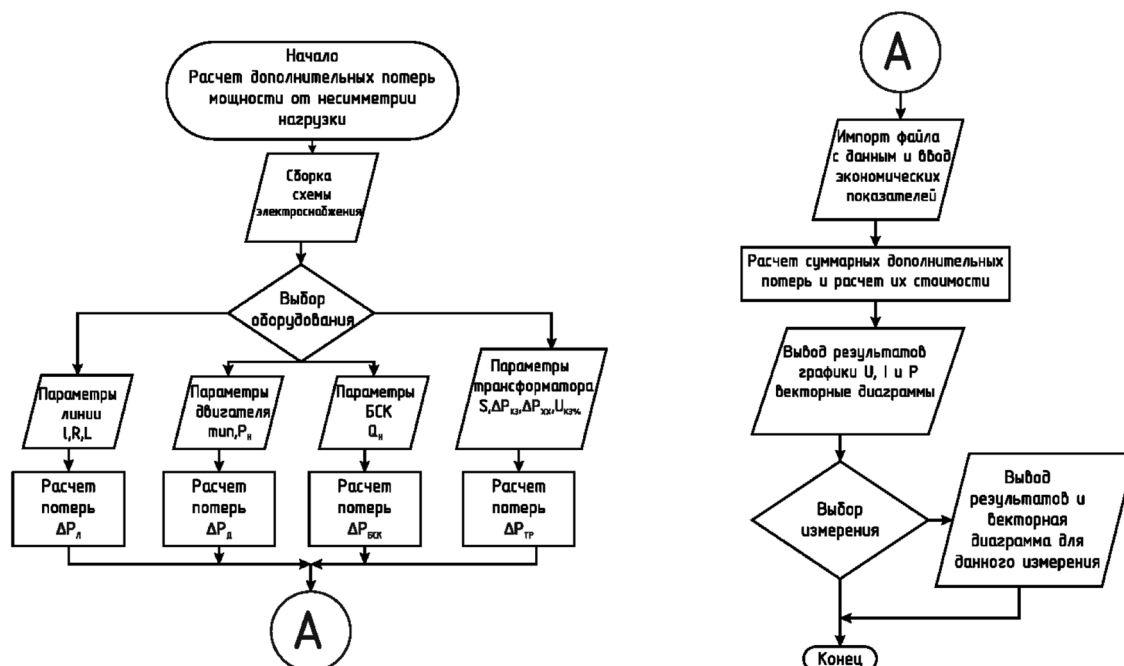


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения дополнительных потерь мощности

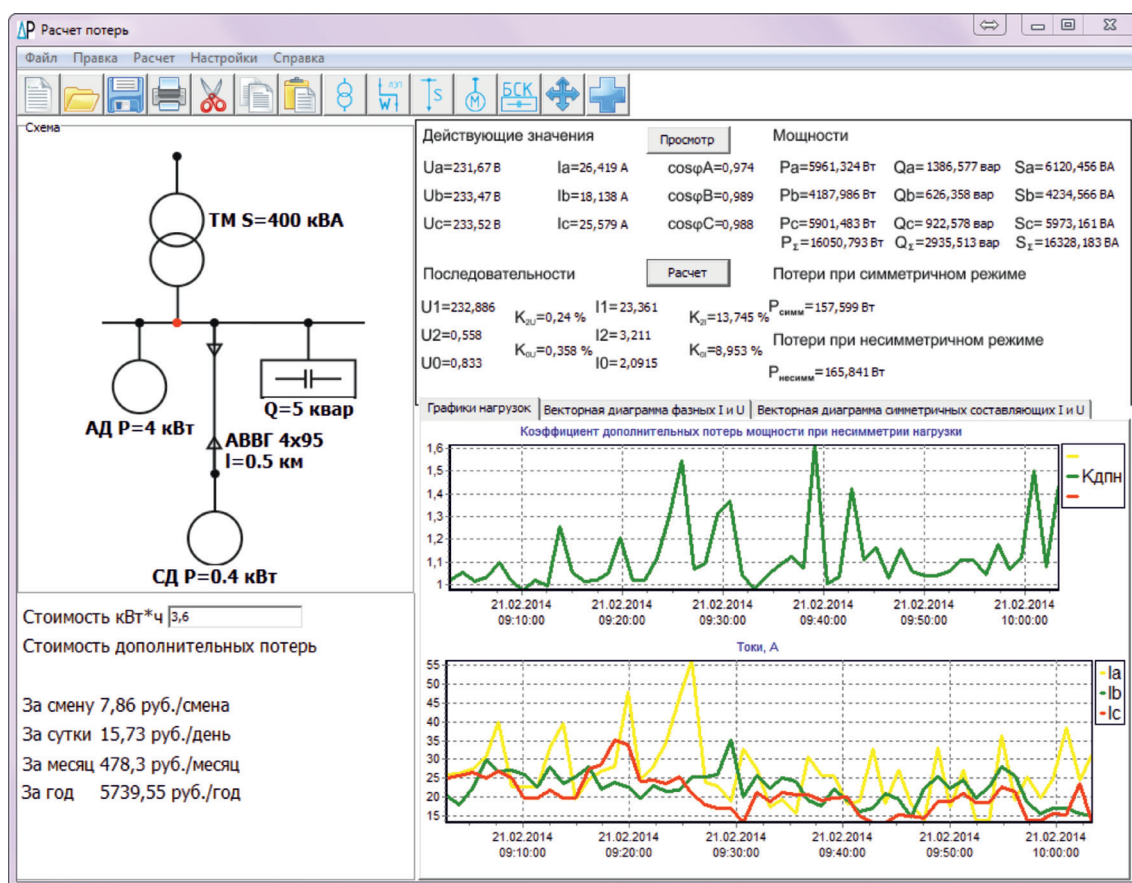


Рис. 2. Интерфейс программы: окно вывода результатов, результат расчета коэффициента дополнительных потерь мощности

Список литературы

1. Дед А.В. Оценка дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ на основе экспериментальных данных / А.В. Дед, С.В. Бирюков, А.В. Паршукова // Успехи современного естествознания. – Пенза, 2014. – № 11–3. – С. 64–67.
2. Дед А.В. Способы расчета потерь активной мощности в силовых трансформаторах при несимметрии токов и напряжений / А.В. Дед, А.В. Паршукова // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2014. – № 10-2 (29). – С. 16–17.
3. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: «Изд-во НЦ ЭНАС», 2002.
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. Приказ Минэнерго России от 30 декабря 2008 г. № 326 «Об организации в министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» URL: http://minenergo.gov.ru/documents/fold13/?ELEMENT_ID=757 (дата обращения: 15.06.15)
6. Указ Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 г. № 889 URL: <http://www.rg.ru/2008/06/07/ukaz-dok.html> (дата обращения: 15.06.15).
7. Воротницкий В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др. под ред. Казанцева В.Н. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 386 с.
8. Шведов Г.В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение: учебное пособие для вузов / Г.В. Шведов, О.В. Сипачева, О.В. Савченко; под ред. Ю.С. Железко. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013. – 424 с.
9. Шидловский А.Н. Повышение качества энергии в электрических сетях. / А.Н. Шидловский, В.Г. Кузнецов – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.