

УДК 621.316.11

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ УЧЕТА НЕСИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК ПРИ ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Дед А.В., Паршукова А.В.

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

В статье рассмотрены основные способы учета наличия несимметричной нагрузки при расчете потерь мощности. Определено, что не все уравнения учитывают наличие амплитудно-угловой несимметрии, когда различен сдвиг углов фаз токов по отношению к своим напряжениям. Выполнен сравнительный расчет коэффициентов учета несимметрии токов и напряжений на основе реальных экспериментальных данных измерений показателей качества электрической энергии. Установлено, что в случае наличия в сети длительной амплитудно-фазовой несимметрии токов и напряжений необходимо обоснованно подходить к выбору метода определения дополнительных потерь. Представлены временные графики изменения коэффициентов, учитывающих несимметричный характер нагрузки, определены соответствующие им значения основных параметров электрической энергии и показателей качества электрической энергии.

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

COMPARISON OF METHODS OF CALCULATION OF COEFFICIENTS OF THE ACCOUNTING OF ASYMMETRY OF DISTRIBUTION OF LOADINGS AT THE ASSESSMENT OF LOSSES OF POWER

Ded A.V., Parshukova A.V.

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

In article the main ways of the accounting of existence of asymmetrical loading at calculation of losses of power are considered. It is defined, what not all equations consider existence of amplitude and angular asymmetry when shift of corners of phases of currents in relation to the tension is various. Comparative calculation of coefficients of the accounting of asymmetry of currents and tension on the basis of real experimental data of measurements of indicators of quality of electric energy is executed. It is established that in case of existence in a network of long amplitude-phase asymmetry of currents and tension it is necessary to approach a choice of a method of definition of additional losses reasonably. Temporary schedules of change of the coefficients considering asymmetrical character of loading are submitted, the values of key parameters of electric energy and indicators of quality of electric energy corresponding to them are defined.

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

Вопросам расчета потерь напряжения и мощности в электрических сетях при наличии отклонение параметров качества электрической энергии от требуемых нормативных значений, в частности при наличии несимметрии токов и напряжений, посвящен ряд публикаций [1, 4, 5, 7, 8].

Но в большом разнообразии известных методик расчета потерь типичным остается допущение, что выражения, применяемые в них при расчетах, справедливы при условии потребления мощностей потребителями в неискаженном (номинальном) режиме. Связно это с тем, что при проектировании работа электрических сетей предполагается в номинальном, симметричном, синусоидальном и равномерно активном режиме.

Вместе с тем, основываясь на результаты практических измерений [2, 3], можно утверждать, что в настоящее время в действующих электрических сетях довольно часто распространено явление длительной фазной несимметрии нагрузки.

Как известно, длительные несимметричные режимы возникают в первую оче-

редь при пофазной разнице параметров системы, либо в случае неполнофазных режимов работы электрооборудования или при подключении несимметричных нагрузок [4, 5, 8].

При таких режимах работы в сети присутствует как амплитудная, так и угловая несимметрия токов и соответственно напряжений, приводящие в свою очередь к появлению токов и напряжений с порядком следования фаз отличного от прямого – обратной и нулевой последовательности.

Тем не менее, в применяемых в практике методах расчета потерь соотношения между токами и напряжениями различных фазовых последовательностей не учитываются. Данное обстоятельство осложняет определение первопричин, вызывающих увеличение дополнительных потерь мощности и целесообразность применения способов их ограничения.

Рассмотрим наиболее широко известные и применяемые способы учета влияния несимметрии нагрузок фаз при расчете величины потери мощности.

Основной директивной методикой по расчету потерь является приказ Министерства энергетики РФ 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» [6]. Согласно [6] при определении потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ для учета неравномерности распределения нагрузок по фазам, рекомендуется применять коэффициент $K_{\text{НЕР}}$ [4]:

$$K_{\text{НЕР}} = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} \left(1 + 1,5 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}} \right) - 1,5 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{Н}}/R_{\text{Ф}}$ – отношение сопротивлений нулевого и фазного проводов;

I_A, I_B, I_C – измеренные токи фаз.

В случае отсутствия достоверных данных о токовых нагрузках фаз в соответствии с вышеуказанным приказом допускается принимать значение $K_{\text{НЕР}}$ равным:

- $K_{\text{НЕР}} = 1,13$, при $R_{\text{Н}}/R_{\text{Ф}} = 1$;
- $K_{\text{НЕР}} = 1,2$ при $R_{\text{Н}}/R_{\text{Ф}} = 2$.

В работе [4], в качестве одного из количественных показателей, характеризующих схему сети на основе объективных данных, для выведения зависимости потерь от несимметрии нагрузки, предлагается использовать коэффициент неодинаковости нагрузок фаз (несимметрии токов) $K_{\text{НЕС}}$ ($K_{\text{НН}}$)

$$K_{\text{НЕС}} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3I_{\text{CP}}^2} \left(1 + 1,5 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}} \right) - 1,5 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{Н}}$ и $R_{\text{Ф}}$ – сопротивления нулевого и фазного проводов;

I_A, I_B, I_C – токи фаз;

I_{CP} – среднее значение токов фаз.

В практических расчетах, в случае сложности (невозможности) измерения токов фаз во всех линиях на балансе рекомендуется применять при $R_{\text{Н}}/R_{\text{Ф}} = 1 \div 15$ средние значения вышеуказанного коэффициента [4]:

– $K_{\text{НЕС}} = 1,35 \pm 0,2$, для линий с распределенной нагрузкой;

– $K_{\text{НЕС}} = 1,05 \pm 0,05$, для линий с сосредоточенной нагрузкой.

Различие значений $K_{\text{НЕС}}$ для разного типа расположения нагрузок связано с предположением, что линии с сосредоточенными нагрузками имеют большую долю симметричных, трехфазных нагрузок, чем линии с распределенными нагрузками.

Согласно [5] определено, что при расчете потерь мощности, также необходимо принимать во внимание дополнительные

потери от несимметрии нагрузки. Для этого предлагается использовать коэффициент $K_{\text{ДП}}$, учитывающий дополнительные потери от неравномерности нагрузки фаз:

$$K_{\text{ДП}} = N^2 \left(1 + 1,5 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}} \right) - 1,5 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{Н}}$ и $R_{\text{Ф}}$ – сопротивления нейтрального и фазного проводов;

$N^2 = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2}$ – коэффициент нерав-

номерности;

I_A, I_B, I_C – измеренные токи фаз.

Сопоставляя выражения (1)–(3), можно утверждать, что в случае расчета по измеренным величинам токов фаз значений $K_{\text{НЕР}}$, $K_{\text{НЕС}}$, $K_{\text{ДП}}$ для одной и той же линии (схемы) будут получены идентичные результаты.

Обусловлено это вследствие равенства (4)

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

В работе [1] указывается, что для сетей 0,38 кВ потери мощности определяются аналогично потерям в сетях 6–10 кВ, но только с учетом важного для сетей 0,38 кВ явления – несимметричной загрузки фаз. Данную «особенность» сетей 0,38 кВ предлагается учитывать через коэффициент неравномерности загрузки фаз – $K_{\text{Н}}$ [1].

Коэффициент увеличения потерь $K_{\text{Н}}$ при неравномерной нагрузке фаз, согласно [1] может быть рассчитан по формуле:

$$K_{\text{Н}} = b_0 + b_1 \frac{I_1}{I_1 + I_2 + I_3}, \quad (5)$$

где I_1, I_2, I_3 – токи фаз в режиме максимальной нагрузки, индекс 1 соответствует наиболее нагруженной фазе;

b_0, b_1 – статистические коэффициенты, значения которых зависят от характера нагрузки (для коммунально-бытовой нагрузки $b_0 = 0,37; b_1 = 3,92$; для смешанной нагрузки $b_0 = 0,18; b_1 = 2,34$).

Как видно из выражений (1)–(5), определенные с их помощью значения потерь мощности не учитывают возможность наличия наряду с амплитудной и угловой несимметрии, когда углы сдвига фаз линейных токов по отношению к своим фазным напряжениям не одинаковы.

Увеличение дополнительных потерь мощности по сравнению с симметричным режимом при наличии угловой несимметрии в соответствии с [8] можно учесть с помощью коэффициента $K_{\text{ДПН}}$:

$$K_{\text{ДПН}} = 1 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 \left(1 + 3 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}} \right), \quad (6)$$

где K_{2p} , K_{0l} – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности;
 R_n и R_ϕ – сопротивления нулевого и фазного проводов.

В тоже время в работе [8] на основании наличия в четырехпроводных сетях 0,38кВ неравенства (7), и предположения о практически одинаковом характере нагрузок отдельных фаз, допускается возможность

пренебречь величиной угловой несимметрии токов при расчете дополнительных потерь мощности:

$$U_2 \ll U_1 \gg U_0, \quad (7)$$

где U_1 – напряжение прямой последовательности;
 U_2 – напряжение обратной последовательности;
 U_0 – напряжение нулевой последовательности.

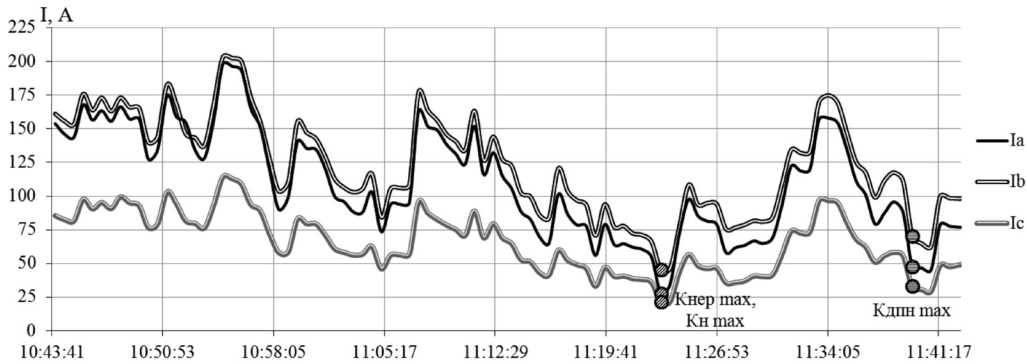


Рис. 1. Графики изменения токов фаз A, B, C

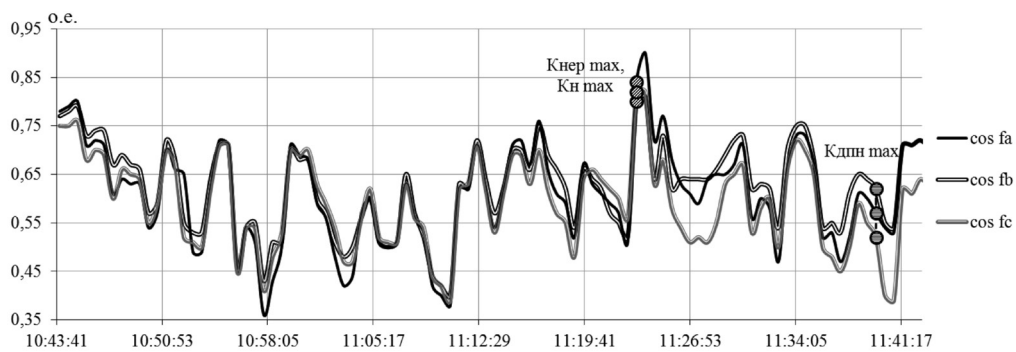


Рис. 2. Графики изменения коэффициента мощности $\cos \varphi$ фаз A, B, C

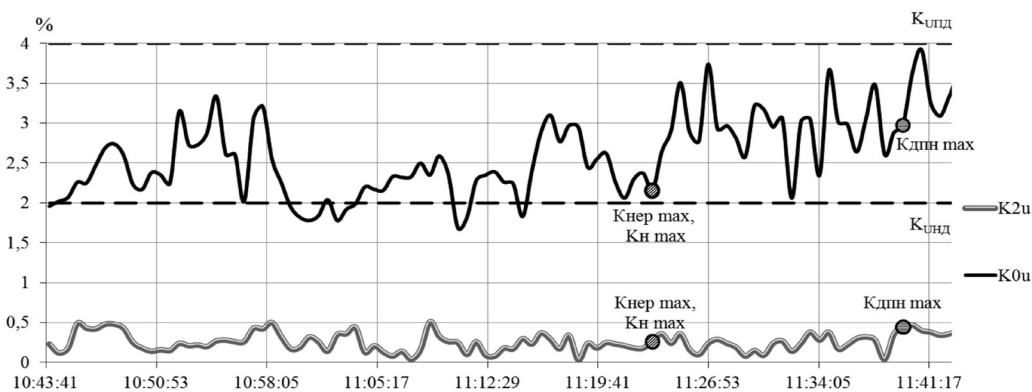


Рис. 3. Графики изменения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной (K_{2U}) и нулевой (K_{0U}) последовательности

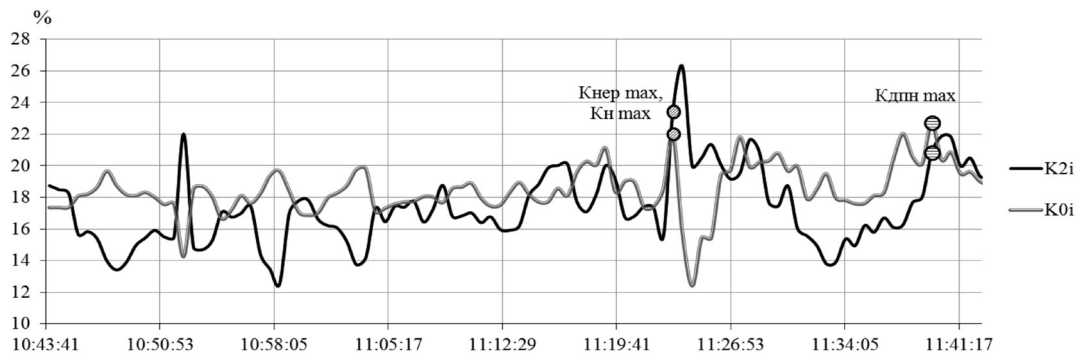


Рис. 4. Графики изменения коэффициентов несимметрии токов по обратной (K_{2i}) и нулевой (K_{0i}) последовательности

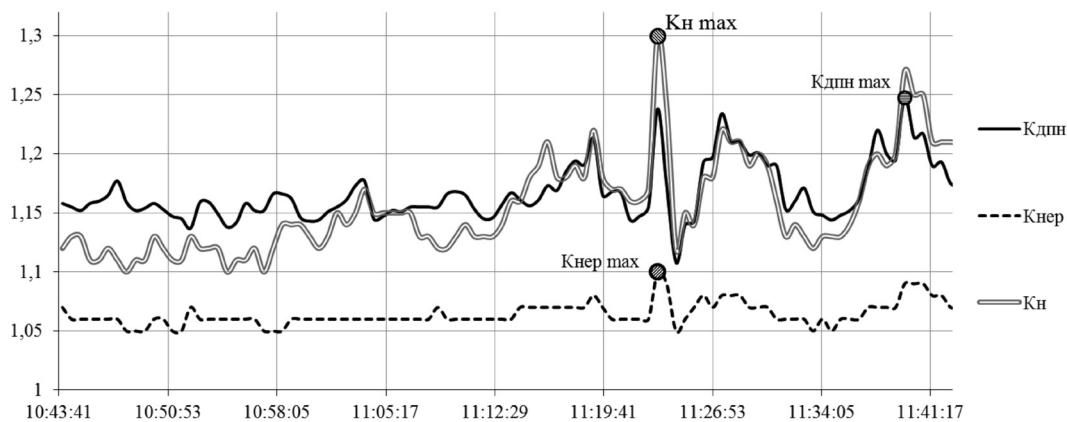


Рис. 5. Графики изменения коэффициентов ($K_{опн}$, $K_{нер}$, $K_{н}$), учитывающих несимметричный характер нагрузки

Для оценки и анализа возможных результатов значений коэффициентов, учитывающих дополнительные потери мощности от несимметрии нагрузки, произведен их сравнительный расчет на основе реальных данных, полученных в ходе измерений показателей качества электрической энергии.

В качестве опытных данных выбраны значения, полученные при измерении показателей качества и основных параметров электрической энергии в распределительных сетях 0,38 кВ предприятия строительной отрасли (рис. 1–4).

Исходя из анализа полученных данных и графиков (рис. 1–4), можно утверждать о наличии в сети амплитудно-фазовой несимметрии напряжений и токов. Как видно из графика на рис. 5, коэффициент несимметрии по нулевой последовательности напряжения K_{0U} , за выбранный интервал, превышает нормально допустимое значение, что говорит о наличии подключенной к ис-

следуемому центру питания искажающей симметрию нагрузку.

Аналогичным образом на это указывает рис. 4, где токи обратной и нулевой последовательности составляют соответственно 12÷26% и 12÷22% относительно тока прямой последовательности.

На основании данных полученных (для $R_{H1} = R_{\phi}$) с помощью выражений (2), (5), (6) был осуществлен расчет коэффициентов, учитывающих в той или иной мере дополнительные потери мощности.

По результатам расчетов построены графические зависимости (рис. 5), на которых, в том числе, отображены метки максимальных значений каждого из рассчитываемых коэффициентов – $K_{нерmax}$, $K_{нmax}$, $K_{дпнmax}$.

Дополнительно, соответствующие расчетным максимальным значениями коэффициентов $K_{нер}$, $K_{н}$ и $K_{дпн}$ метки указаны и на остальных графиках, для визуального определения и соотнесения необходимого электрического параметра режима.

Таблица 1

Сопоставление коэффициентов $K_{\text{НЕР}}$, $K_{\text{Н}}$ и $K_{\text{ДПН}}$ и электрических параметров исследуемого участка сети

Коэффициент		Измеренные электрические параметры					
Обозначение	Максимальное значение	$U_a, \text{В}$	$U_b, \text{В}$	$U_c, \text{В}$	$I_a, \text{А}$	$I_b, \text{А}$	$I_c, \text{А}$
$K_{\text{НЕР}}$	1,1	225,12	233,05	229,58	27,76	45,33	21,54
$K_{\text{Н}}$	1,3						
$K_{\text{ДПН}}$	1,248	224,99	238,26	233,3	47,91	70,65	33,06

Таблица 2

Сопоставление коэффициентов $K_{\text{НЕР}}$, $K_{\text{Н}}$ и $K_{\text{ДПН}}$ и показателей качества электрической энергии исследуемого участка сети

Коэффициент		Измеренные электрические параметры и показатели качества электрической энергии						
Обозначение	Максимальное значение	$\cos \varphi_a$	$\cos \varphi_b$	$\cos \varphi_c$	$K_{2U}, \%$	$K_{0U}, \%$	$K_{2I}, \%$	$K_{0I}, \%$
$K_{\text{НЕР}}$	1,1	0,84	0,8	0,82	0,27	2,16	23,45	21,99
$K_{\text{Н}}$	1,3							
$K_{\text{ДПН}}$	1,248	0,57	0,62	0,52	0,45	2,98	20,83	22,73

Максимальные значения рассчитанных коэффициентов $K_{\text{НЕР}}$, $K_{\text{Н}}$, $K_{\text{ДПН}}$ и соответствующие им значения параметров электрической энергии и показателей качества электрической энергии представлены в табл. 1 и 2.

Среднее значение $K_{\text{НЕР}}$ определенное по (1) свидетельствует о возможном увеличении потерь за исследуемый период на 6%, при аналогичных входящих данных выражения (5) и (6) дают средний результат $K_{\text{Н}}$ и $K_{\text{ДПН}}$ в 16% и 17% соответственно.

Полученные результаты указывают, на сколько потери мощности с учетом несимметрии могут превышать потери мощности, обусловленные протеканием только токов прямой последовательности в исследуемой сети за выбранный временной интервал.

Проанализировав результаты расчетов и полученные зависимости можно утверждать, что в случае наличия в сети амплитудно-фазовой несимметрии, необоснованное использование вышеуказанных методов учета дополнительных потерь мощности, может привести к различию фактического влияния несимметрии токов и напряжений на величину потерь и полученных при расчете дополнительных потерь мощности оценочных значений.

Список литературы

1. 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.
2. Дед А.В. Определение потерь мощности в распределительных сетях с учетом влияния несимметричной нагрузки / А.В. Дед // Омский научный вестник. – 2009. – № 2 (80). – С. 167–170.
3. 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. – 2014. – № 11–3. – С. 64–67.
4. Железко Ю. С Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.
5. 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.
6. 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).
7. 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.
8. Шидловский А.Н. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.Н. Шидловский, В.Г. Кузнецов – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.