

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К УЧЕТУ НЕСИММЕТРИЧНЫХ НАГРУЗОК В РАСЧЕТАХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Куденко Г.Е., ОАО «Донецкоблэнерго», Павловский В.В., и-т электродинамики НАН Украины, Сидоренко А.А., ОАО «Донецкоблэнерго»

Offered statistical approach of account of the asymmetrical loadings at the mathematical design of the modes of operations of electric networks with a purpose determination of technical losses of power and energy. The recreation of the asymmetrical loadings did possible application of skhemotekhnicheskyykh methods of calculation of losses of power in distributive networks, that in the turn, allows considerably more precisely to define influence of nesymmetry on the losses powers and energies.

Наиболее точные результаты определения технических потерь мощности и энергии в электрических сетях могут быть получены с помощью методов математического моделирования режимов работы сети (так называемые схмотехнические методы расчета потерь [1,2]). Основным сдерживающим фактором в применении схмотехнических расчетов потерь в распределительных сетях является отсутствие информации о нагрузках трансформаторных подстанций (ТП). Большинство известных методов [3,4] опираются на допущение об одинаковых коэффициентах нагрузки всех ТП в моделируемой сети. Однако, как показали исследования [5] ввиду нелинейной, близкой к квадратичной зависимости потерь активной мощности от токов нагрузки, потери энергии, рассчитанные по принципу распределения нагрузок в сети пропорционально номинальным мощностям трансформаторов, занижены по сравнению с действительными потерями. В действительности колебания нагрузки в узлах распределительной сети представляет собой нестационарный случайный процесс. Коэффициенты загрузки ТП неодинаковы и изменяются в определенном диапазоне. В соответствии с положениями теории электрических нагрузок [5,6] в определенных интервалах нагрузка ТП может быть представлена как стационарный случайный процесс, подчиняющийся нормальному закону распределения вероятностей. Последнее позволяет применить аппарат теории вероятностей и математической статистики для определения характеристик случайной величины нагрузки ТП [7]. Затем методами имитационного моделирования можно воссоздавать нагрузки для всей распределительной сети соответствующие исследованным характеристиками для последующих расчетов потерь схмотехническими методами.

Кроме решения проблемы моделирования нагрузок ТП при определении потерь в распределительных сетях необходимо также учитывать в расчетах несимметрию нагрузок. Наличие токов обратной и особенно нулевой последовательности (в нулевом проводе) приводит к появлению дополнительных потерь мощности в ЛЭП. При наличии несимметричных нагрузок постоянные составляющие токов, протекающие по проводам трансформатора вызывают насыщение магнитопровода, что приводит к существенному увеличению намагничивающего тока и связанных с ним потерь в стали [8]. Результаты расчетных экспериментов [5] показали, что учет реальной несимметрии нагрузок по фазам может вдвое занижать фактическое значение потерь (для сетей 0,4 кВ). Поэтому, на практике при использовании однолинейной схемы замещения в схмотехнических расчетах или при применении других методов дополнительное увеличение потерь от несимметрии нагрузки учитывают с помощью специальных коэффициентов. К сожалению, анализ публикаций и используемых сегодня методик показывает, что они не всегда опираются на обоснованные расчетами коэффициенты. Например, действующая в Украине методика нормирования потерь [4], базирующаяся на теоретических основах, заложенных в работе [5], использует повышающий коэффициент для учета несимметрии нагрузок при расчете потерь, равный 1,6 для сетей 0,4кВ и 1 для всех остальных. В свою очередь [5] в этом вопросе отсылает нас к более ранней монографии [9]. Эта работа содержит выражение для вычисления коэффициента, учитывающего дополнительные потери из-за неравномерной загрузки фаз со ссылкой на Руководящие Указания, датированные 1956 годом.

$$k = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{I_A}{I_{cp}} \right)^2 + \left(\frac{I_B}{I_{cp}} \right)^2 + \left(\frac{I_C}{I_{cp}} \right)^2 \right] \left(1 + 1,5 \frac{R_N}{R} \right) - 1,5 \frac{R_N}{R}, \quad (1)$$

$$I_{cp} = \frac{1}{3} [I_A + I_B + I_C], \quad (2)$$

где I_A, I_B, I_C – фазные токи, I_{cp} – среднее значение тока нагрузки, R, R_N – активные сопротивления провода фазы и нулевого провода. В соответствии с нормами проектирования разница в токах наиболее и наименее нагруженных фаз не должна превышать 15% в начале питающих линий 0,4кВ городских сетей. [10].

Хотя в работе [11] установлено, что для городских распределительных сетей типичным является соотношение фазных нагрузок здания 1:0,8:0,6. Используя расчетные формулы (1) и (2) и пренебрегая угловой несимметрией токов, как предложено в работе [12], а также принимая что $R = R_N$ определим дополнительные потери мощности из-за неравномерности загрузки фаз

$$I_{cp} = \frac{1}{3} [1 + 0,8 + 0,6] = 0,8, \quad k = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{1}{0,8} \right)^2 + \left(\frac{0,8}{0,8} \right)^2 + \left(\frac{0,6}{0,8} \right)^2 \right] (1 + 1,5) - 1,5 = 1,1$$

Среднее значение тока нагрузки, определенное по (2) является током прямой последовательности при допущении об отсутствии угловой несимметрии системы фазных токов. При наличии угловой несимметрии значение I_{cp} будет несколько меньше, чем определенное по формуле (2), а следовательно дополнительные потери из-за неравномерной загрузки фаз – больше. Например, при $\cos(\varphi_A) = 0,8$ и $\cos(\varphi_B) = \cos(\varphi_C) = 1$ имеем $I_{cp} = 0,76$ и $k = 1,4$

Как правило, несимметрия нагрузки в сельских распределительных электрических сетях еще больше, чем в городских из-за меньшего количество потребителей на одном ТП. Увеличение количества однофазных потребителей, подключенных к одному трансформатору, снижает результирующую несимметрию нагрузки ТП.

Другой подход к оценке влияния несимметрии на потери предложен в работе [12]. Теоретически, на основе метода симметричных составляющих проанализировано влияние несимметрии фазных токов на потери активной мощности и выведены формулы, позволяющие аналитически оценивать влияние несимметрии на потери в элементах сети. Для получения коэффициентов несимметрии и неуравновешенности необходимо определить симметричные составляющие. Последнее подразумевает, что известны (рассчитаны или замерены) значения токов каждой из фаз.

$$k = K^2 \left[1 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_0 (1 + 3R_N / R) \right], \quad (3)$$

где $\varepsilon_2, \varepsilon_0$ – коэффициенты несимметрии и неуравновешенности токов, $\varepsilon_2 = I_2 / I_1$; $\varepsilon_0 = I_0 / I_1$.

$$K = I_1 / I_{cp},$$

где I_1, I_2, I_0 – значения симметричных составляющих токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Пренебрегая угловой несимметрией токов $I_1 = I_{cp}$ и, следовательно, $K = 1$. Для сетей с изолированной нейтралью ($I_0 = 0$), и формула (3) принимает вид

$$k = K^2 \left[1 + \varepsilon_2^2 \right] \quad (4)$$

Для четырехпроводной сети с соотношением фазных токов 1:0,8:0,6 пренебрегая угловой несимметрией и принимая $R = R_N$ коэффициент увеличения потерь мощности при несимметрии определенный по формуле (3) составляет 1,59. А для трехпроводной сети с изолированной нейтралью – 1,02. Предложенные методы могут быть использованы для оценки влияния несимметрии нагрузок на потери в отдельных элементах сети, для которых известны токи фаз и значения сопротивлений.

Однако, в этой работе задача состоит в определении увеличения потерь мощности в несимметричных режимах реальных распределительных сетей, содержащих огромное количество элементов. Как правило, фазные токи во всех элементах сети неизвестны.

Нагрузка каждой фазы на стороне 0,4 кВ ТП в интервале стационарности определяется количеством и мощностью подключенных электроприемников и является случайной величиной. Следовательно, несимметрия нагрузок может быть также, как относительная нагрузка ТП быть смоделирована вероятностными методами [7]. В таком случае анализ влияния несимметрии токов нагрузки может быть легко реализован на базе схмотехнических расчетов сетей в фазных координатах, что стало возможным для больших распределительных сетей только с применением современного инженерного программного обеспечения и высокопроизводительных ПК. Под таким расчетом понимается расчет установившегося режима при задании нагрузок ТП 6-10/0,4 токами фаз на стороне низшего напряжения. В соответствии с рекомендациями [13] при расчете сетей с несимметрией, нагрузки следует представлять линейными проводимостями, так как погрешность вследствие неучета нелинейности реальных статических характеристик незначительна. Необходимость учета статических характеристик нагрузки для расчета нормальных режимов работы сетей в фазных координатах объясняется наличием несимметрии напряжений, пренебрегать которой недопустимо.

Производить замеры нагрузок для всех ТП с целью изучения характеристик случайной величины – несимметрии нагрузки не представляется возможным из-за огромного объема задачи. Для распределительной сети 6-10 кВ содержащей 350 ТП были произведены замеры фазных токов нагрузок и тока нулевого провода на стороне 0,4кВ двадцати пяти ТП с фиксацией меток времени замеров в области вечернего максимума. На основе снятого графика нагрузок по фидерам 6-10 кВ питающих ТП выборки, все измерения были приведены к периоду стационарности графика (вечерний максимум). Таким образом, была получена статистическая выборка

замеров фазных токов объемом 75 измерений (25ТП по 3 фазных замера). Далее для каждого замера был определен коэффициент несимметрии k_i как

$$k_i = \frac{I_i}{I_{cp}}, \quad (5)$$

где I_i – замеренный ток нагрузки фазы i . Из гистограммы (рис. 1) видно, что наибольшие групповые частоты (наибольшая вероятность - p) приходятся на интервал 0,95-1,1.

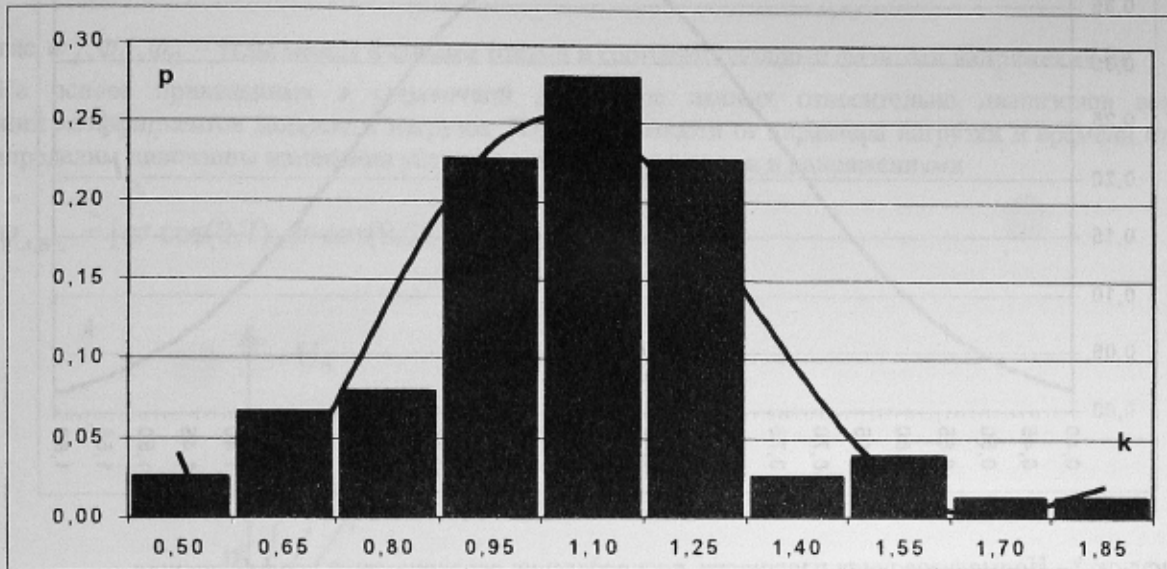


Рисунок 1 - Гистограмма вероятностного распределения коэффициента несимметрии (k) нагрузок

Выравнивающая кривая близка к нормальному закону распределения. Следовательно, используя подход, изложенный в [7] определим доверительный интервал среднего значения, среднеквадратичного отклонения коэффициента несимметрии. Исходя из принципа практической уверенности [14] примем как достаточную доверительную вероятность не менее 0,9.

Тогда ошибка выборки с доверительной вероятностью 0,9, определяется как

$$d = \frac{st_{n,0,9}}{m\sqrt{N}} 100\%; n=N-1, \quad (6)$$

где s – среднеквадратичное отклонение, N – объем выборки, $t_{n,0,9}$ – коэффициент Стюдента, m – среднее значение коэффициента несимметрии. Для полученной статистической выборки замеров: $s = 0,241$; $N = 75$; $m = 1$; $t_{74,0,9} = 1,671$. Тогда ошибка выборки

$$d = \frac{0,241 \times 1,671}{1\sqrt{75}} 100\% = 4,65\%.$$

Доверительный интервал среднего значения – $m \pm d$ [0,954-1,046], среднеквадратичного отклонения – [0,23-0,32]. На основании принципа практической уверенности и формул полученных в [7] можно с доверительной вероятностью 0,9 утверждать, что 92% всех возможных значений коэффициента несимметрии лежат в пределах от 0,404 до 1,596. Полученный результат соответствует предельной несимметрии нагрузочных фазных токов 1:0,63:0,25. Как и ожидалось, предельная несимметрия в сельских распределительных сетях, для которых были произведены выборочные замеры, больше, чем для городских. Нормализованная плотность распределения вероятностей коэффициента несимметрии в полученном доверительном интервале описываются классической формулой Гаусса

$$p(k) = f(k) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(k-m)^2}{2s^2}\right]} \quad (7)$$

и показана на рис.2. Площадь ограниченная сверху и снизу кривой распределения и осью абсцисс, а справа и слева значениями 0,404 и 1,596 составляет 0,92, т.е. 92% всех возможных значений коэффициента несимметрии.

Изучение характеристик случайной величины – несимметрии фазных нагрузок – необходимо для воссоздания методами имитационного моделирования расчетной несимметрии, используемой далее в схмотехнических расчетах потерь. Генерируя случайные числа в диапазоне от нуля до единицы с равномерной плотностью распределения необходимо получить распределение коэффициента фазных нагрузок с

определенными характеристиками случайной величины и нормальной плотностью. Для этого была найдена обратная функция от плотности распределения (7), и аппроксимирующий ее полином 4-го порядка

$$y = (-5 \times 10^{-10})x^4 + (1 \times 10^{-6})x^3 - (2 \times 10^{-4})x^2 + 0,015x + 0,56 \quad (8)$$

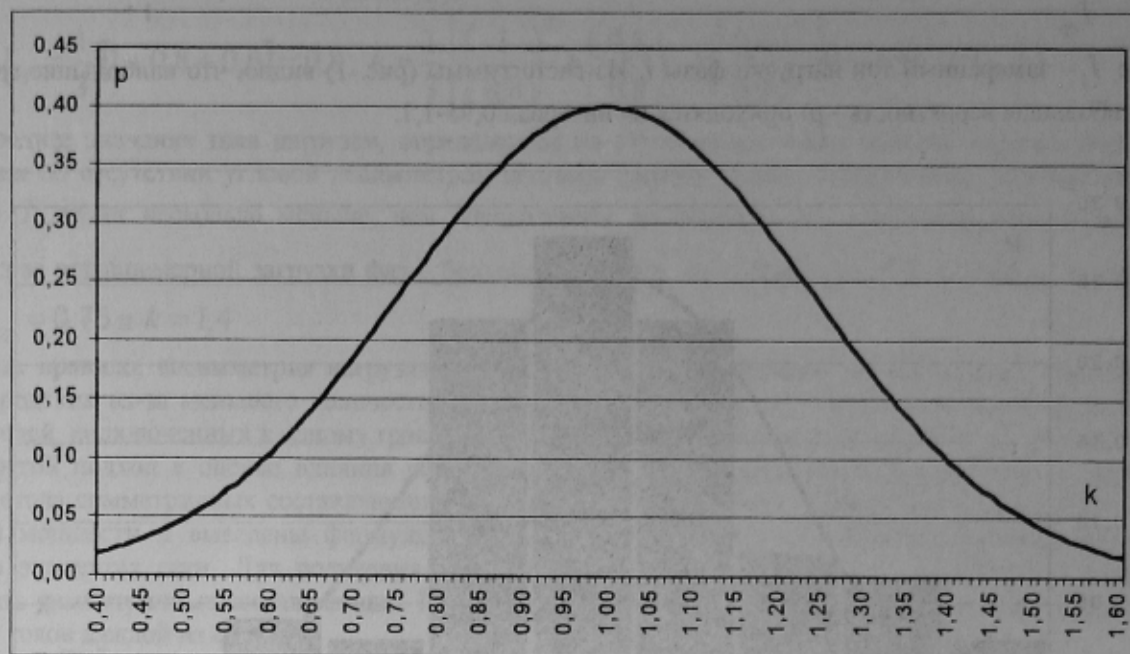


Рисунок 2 - Нормализованная плотность распределения вероятностей коэффициента несимметрии

Для каждого ТП распределительной сети сгенерированное случайное число [0-1] используется для вычисления значения полинома. Значение полинома соответствует коэффициенту несимметрии фазных нагрузок. Интервал случайных чисел [0-1] полностью описывает определенный ранее диапазон изменения коэффициента несимметрии [0,404; 1,596]. Причем как можно видеть из рисунка 3, 68% случайно сгенерированных чисел будут давать коэффициенты несимметрии $[m-s; m+s]$, то есть [0,759-1,241]. Последнее полностью соответствует правилу, известному в теории вероятности как «правило трех сигма».

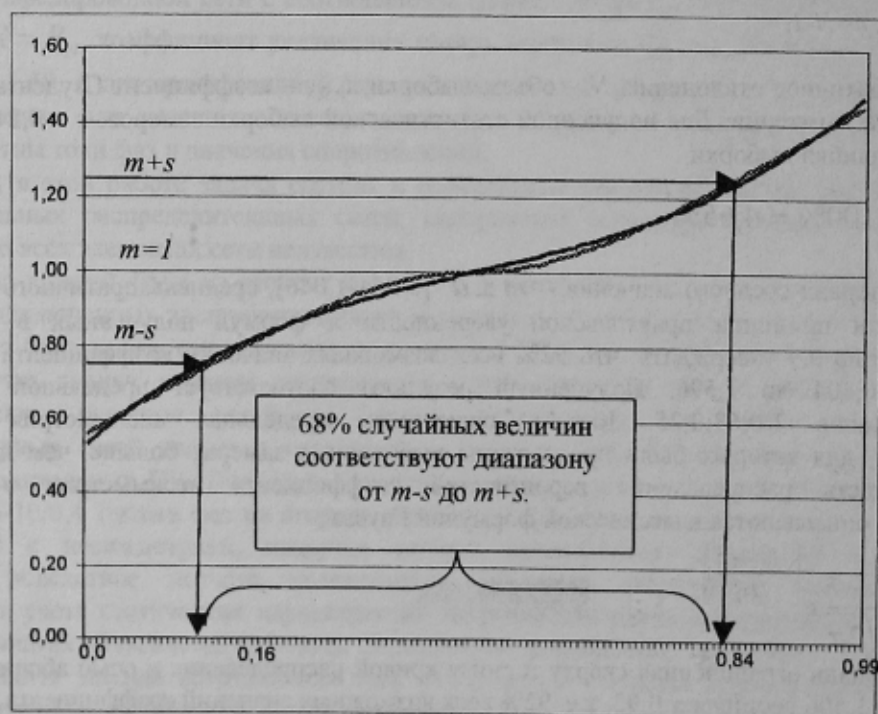


Рисунок 3 - Обратная функция плотности распределения и аппроксимирующий ее полином

Генерируя коэффициенты несимметрии нагрузочных токов для каждого ТП, легко определить фазные нагрузочные токи ТП, отражающие случайную несимметрию с определенными характеристиками. Эти значения нагрузок далее используются как расчетные для математического моделирования режимов работы сети.

Аналогичный подход может быть реализован для изучения характеристик и воссоздания фазной несимметрии нагрузочных токов. В общем случае,

$$I_N = \left| I_A e^{j\varphi_A} + I_B e^{j120+\varphi_B} + I_C e^{j240+\varphi_C} \right|, \quad (9)$$

где $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – углы между фазными токами и соответствующими фазными напряжениями.

На основе приведенных в справочной литературе данных относительно диапазонов возможных изменений коэффициентов мощности нагрузок ТП в зависимости от характера нагрузки и времени суток [0,7-0,92], определим диапазоны изменения углов между фазными токами и напряжениями

$$\varphi_{A,B,C} = [\arccos(0,7); \arccos(0,92)] = 25^\circ - 18^\circ \text{ (рис. 4).}$$

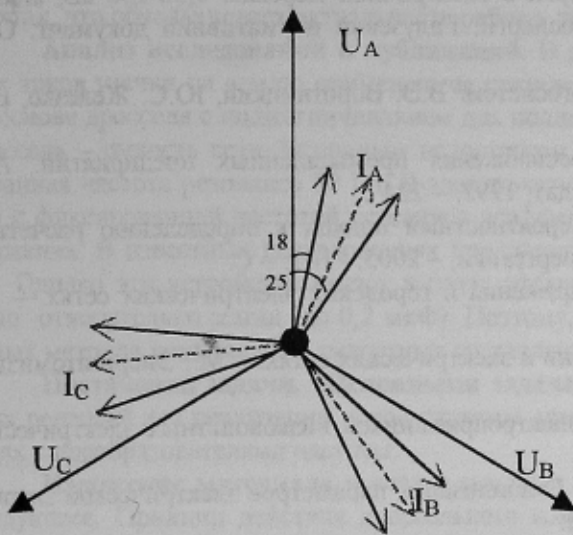


Рисунок 4 - Векторная диаграмма нагрузочных токов и напряжений (сторона 0,4 кВ ТП)

Пренебрегая угловой несимметрией ($\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = 0$) выражение (9) должно выполняться для замеренных значений токов. Если же равенство (9) не соблюдается, то это обуславливается либо ошибками измерений токов фаз и тока в нулевом проводе, либо наличием угловой несимметрии. Полагая, что измерения были проведены достаточно точно, определим значения углов для каждого фазного тока подбором значений $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$. Очевидно, в общем случае может быть не одно решение ($\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$), удовлетворяющее (9). Поэтому, будем находить решения, соответствующее минимальной несимметрии токов при которой удовлетворяется условие (9). Для этого в качестве начального приближения используем $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = 25 + 18 / 2 = 21,5$. Если условие (9) не выполняется, будем поочередно для каждой фазы изменять значение угла на достаточно малую величину. Такой процесс будем продолжать до тех пор пока не будет удовлетворяться условие (9) с заданной точностью для каждого ТП. В результате получим 75 значений углов между фазными токами и напряжениями, которые составляют случайную выборку.

Эта случайная выборка изучена, аналогично коэффициентам несимметрии. Для полученной статистической выборки замеров: $s = 8$; $N = 75$; $m = 21$; $t_{74;0,9} = 1,671$. Тогда ошибка выборки

$$d = \frac{8 \times 1,671}{21\sqrt{75}} 100\% = 7,4\%.$$

Доверительный интервал среднего значения – $m \pm d$ [19,5-22,5], среднеквадратичного отклонения – [7,1-9,6]. Таким образом, можно с доверительной вероятностью 0,9 утверждать, что 92% всех возможных значений углов между фазными токами и напряжениями лежат в пределах от 2,9 до 39,1 градусов. Или, иными

словами, коэффициент мощности нагрузки каждой из фаз может изменяться в пределах 0,77-0,99 по нормальному закону распределения вероятностей с определенными выше характеристиками случайной величины. Далее, используя аналогичные рассуждения как и для случая коэффициентов несимметрии, методами имитационного моделирования рассчитываем угловую несимметрию токов для всех ТП распределительной сети. При этом ошибка определения значения фазы не превышает 8%.

Таким образом, применяя положения математической статистики на базе замеров нагрузочных токов для ограниченного числа ТП, определены с заданной точностью параметры комплексной несимметрии нагрузок всей распределительной сети. Воссоздание несимметричных нагрузок ТП сделало возможным применение схмотехнических методов расчета потерь мощности в распределительных сетях, что в свою очередь, позволяет значительно точнее определить влияние несимметрии на потери мощности и энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. Куденко Г.Е., Павловский В.В. Инженерный расчет потерь мощности и энергии в электрических сетях, основанный на моделировании установившихся режимов//Электрические сети и системы.–2004.-№3. - С. 17-22.
3. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: ЭНАС, 2003.— 280 с.
4. Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. Галузевий нормативний документ. ОЕП „ГРІФРЕ”. - 2004. - 115 с.
5. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем/ В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; -- М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
6. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
7. Куденко Г.Е., Павловский В.В., Бондарь Д.В., Вероятностный подход к определению расчетных нагрузок ТП 6-10/0,4кВ распределительных сетей // Новини енергетики. – 2005. - №1. – С.
8. Марушкевич М.С., Солдаткина Л.А. Качество напряжения в городских электрических сетях. – М.: Энергия, 1975.— 256 с.
9. Поспелов Г.Е., Сыч Н.М. Потери мощности и энергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1981.—216 с.
10. Жаркин А.Ф. Анализ несимметрии нелинейных электроприемников низковольтных электрических сетей// Технічна електродинаміка. – 2004. - №5. – С. 45-49.
11. Шидловский А.К., Новский В.А., Капльчный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. – Киев. Наук. думка. 1989. – 312 с.
12. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях/ Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б.—Киев: Наук. думка, 1992.—240 с.
13. Меерович Э.А., Горушкин В.И., Голембо З.Б. Расчет токов и напряжений в электроэнергетической системе, питающей несимметричные нагрузки//Электричество.—1955. —№9.—С. 32—39.
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. –М.: Наука.1969.—576 с.