УДК 621.3

С. Д. Винничук, д-р техн. наук
Ин-т проблем моделирования
в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,
тел. (044) 4249171, e-mail: vynnychuk@i.ua)

Обоснование теории мощности системы периодических многофазных токов. II

Предложено рассматривать мощность трехфазного тока как мощность генератора (источника), помещенного в некоторой точке трехфазной системы. Определены составляющие полной мощности для симметричного и несимметричного периодических режимов.

Запропоновано розглядати потужність трьохфазного струму як потужність генератора (джерела), розміщеного у певній точці трьохфазної системи. Визначено складові повної потужності для симетричного та несиметричного періодичних режимів.

Ключевые слова: активная и реактивная мощности, мощность искажения, мощность несимметрии.

Теоретические и технические представления о мощности несимметрии. Наиболее сложные проблемы теории мощности связаны с понятием мощности несимметрии. Известно, что возникновение несимметричных электрических режимов в первую очередь связано с несимметричностью нагрузки фаз. В ряде случаев мощность несимметрии отождествляется с несимметричностью нагрузки, но это не совсем так. Если несимметричность токов и напряжений в сетях низкого напряжения возникает в основном вследствие несимметричности нагрузок, то несимметричность напряжения в линиях высокого напряжения может быть связана также с несимметричным размещением фазных проводов в случае отсутствия транспозиции фаз, особенно при значительных потерях активной мощности на корону. Несимметричными являются и некоторые аварийные режимы, т.е. в гармоническом процессе для токов и напряжений несимметричность режима характеризуется как амплитудной несимметричностью, так и несимметричностью фазных углов.

Рассмотрим влияние несимметричных режимов в электрической сети на элементы сети и на потребителей. Согласно стандарту ГОСТ 13109-97 несимметрия напряжения — это его искажение, связанное с несимметрией напряжений в фазах, которое характеризуется коэффициентом несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям. Несимметрия напряжения возникает при неравномерном подключении по фазам линии однофазных нагрузок. Возникающие при этом токи обратной и нулевой последовательностей создают дополнительные потери активной мощности и энергии в сетях и дополнительное нагревание электродвигателей, что приводит к уменьшению срока службы и надежности электрооборудования [9]. Наиболее чувствительными являются асинхронные электродвигатели (АД). В обмотках АД несимметрия напряжения вызывает дополнительный нагрев и противодействующий вращательный момент. Даже при небольшой несимметрии напряжения возникает значительный ток обратной последовательности, который, накладываясь на ток прямой последовательности, вызывает нагрев электродвигателя, в результате чего уменьшается его мощность и ускоряется старение изоляции.

Принято считать, что для несимметрии напряжения характерно наличие в трехфазной электрической сети напряжения обратной и(или) нулевой последовательностей, которые значительно меньше соответствующих составляющих напряжения прямой (основной) последовательности. На самом деле в случае однофазных подключений потребителей с резистивной нагрузкой составляющие напряжения обратной и нулевой последовательностей отсутствуют. Такие составляющие появляются при наличии трехфазной нагрузки, когда наиболее чувствительными потребителями напряжения являются АД. Тогда несимметрия трехфазной системы напряжений сопровождается наложением на систему прямой последовательности системы обратной последовательности, что приводит к изменению абсолютных значений фазных и межфазных напряжений.

Следует заметить, что в трехфазных сетях с нулевым проводом может возникать несимметрия от наложения на систему прямой последовательности напряжений системы нулевой последовательности. В результате смещения нейтрали возникает несимметрия фазных напряжений даже в случаях, когда симметричной является система межфазных напряжений.

Несимметричные режимы всегда приводят к дополнительным потерям мощности по сравнению с аналогичными симметричными режимами. Но механизмы возникновения таких дополнительных потерь различны.

В случае однофазных подключений в трехфазных линиях электропередач без нулевого провода, когда несимметрия напряжения возникает вследствие несимметрии нагрузок, увеличение потерь активной (и реактивной) мощности связанно с квадратичной зависимостью потерь мощности от действующего значения тока в фазном проводе и может быть представлено в виде

$$\Delta P = r\,(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 - 3((I_a + I_a + I_a)/3)^2),$$

$$\Delta Q = x\,(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 - 3((I_a + I_a + I_a)/3)^2).$$

В случае трехфазных линий электропередач с нулевым проводом оценка потерь мощности вследствие несимметричности режима должна дополнительно включать определение тока нулевой последовательности.

Для несимметричных режимов в электрических сетях в аварийных ситуациях при обрыве фазы или несимметричных коротких замыканиях с переходом на работу в двух- или однофазном режиме следует определять потери как в сети, так и в генераторе, что нуждается в дополнительном изучении.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что факторы, ухудшающие качество электроэнергии, влияют на потери мощности в элементах сети, а также на потери мощности у потребителей. Они связаны с дополнительными затратами мощности источников и должны быть учтены при вычислении технологических потерь электроэнергии.

Анализ способов теоретического описания составляющих мощности несимметрии свидетельствует о том, что в классической теории мощности такие составляющие определяются на основании различных описаний полной мощности (ПМ) многофазной системы. Рассмотрим их.

Существует несколько подходов к определению ПМ многофазной симметричной системы [1, 2, 11]. Первый вариант — ПМ определяется как сумма ПМ всех фаз. Такую ПМ называют арифметической — S_A.

Второй вариант — ПМ для однофазной системы описывается активной и реактивной мощностями, а также мощностью искажения и является их геометрической суммой:

$$S_G^2 = (P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2 + (D_a + D_b + D_c)^2.$$

Третий вариант — определение полной максимальной мощности:

$$S_m^2 = (U_a^2 + U_b^2 + U_c^2)^2 (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)^2.$$

Полную мощность S_m можно определить как максимально возможную активную мощность трехфазной системы для фиксированных значений норм векторов тока и напряжения.

В рамках классической теории мощности [1] несимметричность режима связывают с несимметричностью нагрузки, которую понимают как различные значения комплексных сопротивлений фаз. При этом могут рассматриваться как частные случаи только различные модули при одинаковых фазах или только различные фазы при одинаковых модулях. Поэтому общую мощность несимметрии разделяют на амплитудную $H_{\text{а}}$ и фазную $H_{\text{ф}}$ несимметрии, определяемые как геометрическая разность между ПМ:

$$H_{\text{а}}^2 = S_m^2 - S_a^2, \quad H_{\text{ф}}^2 = S_a^2 - S_G^2, \quad H_{\text{а}}^2 + H_{\text{ф}}^2 = S_m^2 - S_G^2. \tag{24}$$

Однако такая формальная запись не дает ответа на вопрос: если с точки зрения подхода Фрезе потребитель активный, то какая часть мощности несимметрии при этом потребляется?

Формальная запись (24) не дает ответа и на вопрос: как увязать мощности $H_а$ и $H_ф$ с такими характеристиками несимметричности режима как наличие составляющих обратной и нулевой последовательностей напряжения? Оказывается, такой связи не существует, что подтверждает следующий пример.

Пусть токи и напряжения трехфазной системы заданы следующими соотношениями:

$$U_n(x,t) = u_n \sin(\varphi_n(t)), \;\; I_n(x,t) = k\,U_n(x,t), \;\; n = a, b, c, \tag{25}$$

где k — некоторая константа; $u_a \neq u_b \neq u_c$; $\varphi_n(t)$ — линейные функции, причем для произвольных n_1 и n_2 разность $\varphi_{n1}(t) - \varphi_{n2}(t)$ является константой. Тогда для синусоидального режима

$$Q_n = 0\,(n = a, b, c), \;\; P_n = 1/2\,k\,u_n^2\;(n = a, b, c),$$

$$S_A = S_G = S_m = 1/2\,k\,(u_a^2 + u_b^2 + u_c^2), \, H_а = H_ф = 0\,.$$

Следовательно, теоретическое определение понятий мощности амплитудной и фазной несимметрии не согласуется с несимметричностью амплитуд и фазных углов в фазах трехфазной системы, поскольку возможны случаи, когда в соотношениях (25) при $u_a \neq u_b \neq u_c$ модули разности фазных углов будут различны,

$$|\varphi_a(t) - \varphi_b(t)| \neq |\varphi_a(t) - \varphi_c(t)| \neq |\varphi_c(t) - \varphi_b(t)|,$$

а также возможен теоретически исключительный случай,

$$|\varphi_a(t) - \varphi_b(t)| = |\varphi_a(t) - \varphi_c(t)| = |\varphi_c(t) - \varphi_b(t)| = 0,$$

когда работа АД исключена. Поэтому при определении понятия несимметричности режима следует исходить из положений, в которых учтены условия возникновения несимметричных режимов и по току, и по напряжению.

Составляющие мощности относительно источника при несимметричном режиме трехфазной системы. Одной из наиболее существенных особенностей описания несимметричного режима является невозможность пользоваться векторным представлением токов и напряжений, как в случае симметричного режима. Требуется дополнительный анализ всех зависимостей, полученных при условии симметричности режима. Действительно, некорректным оказывается соотношение (13) для определения активной мощности, что просто проверяется в случае аварийного однофазного режима работы, когда независимо от значений тока и напряжения величина суммарной активной мощности P_g равна нулю. Поэтому необходимо определить правила, на основании которых могут быть найдены составляющие ПМ в случае несимметричного режима по току и напряжению. К числу таких простейших правил относится способ определения суммарной активной и реактивной мощности как суммы мощностей фаз трехфазной системы. Рассмотрим его.

Две составляющие мощности трехфазной системы для симметричного режима, $P_{\Sigma}(x)$ и $Q_g(x)$, могут быть найдены как сумма активной и реактивной мощностей каждой из фаз на основании определения среднего на периоде значения их мгновенных мощностей (интеграл суммы функций равняется сумме интегралов). Поэтому расчет суммарных мощностей $P_{\Sigma}(x)$ и $Q_g(x)$ для произвольных режимов как суммы соответствующих мощностей для отдельных фаз можно считать естественным обобщением на несимметричные режимы.

Полная мощность для симметричных режимов включает и мощность искажения. При разложении функций токов и напряжений в ряд Фурье величины амплитудной и фазной составляющих мощности искажения определяются согласно зависимости (22) отдельно для каждой из фаз. Поэтому и мощность искажения в случае несимметричных режимов может быть найдена как сумма мощностей несимметрии каждой фазы.

В рамках классической теории мощности мощность искажения рассматривается как отдельная величина, геометрически суммируемая с другими составляющими ПМ, которые можно искать при условии равенства нулю мощности искажения. Тогда, представив токи и напряжения в виде рядов Фурье

$$u_n(x,t)=\sum_{k=1}^{\infty}u_{k,\,n}(x)\sin(\omega kt+\varphi_{k,\,n}),$$
$$i_n(x,t)=\sum_{k=1}^{\infty}i_{k,\,n}(x)\sin(\omega kt+\psi_{k,\,n}),\; n=a,b,c, \tag{26}$$

для амплитуд и фазных углов гармоник (из условия отсутствия мощности искажения) в каждой из фаз, получим соотношения, аналогичные (21):

$$I_{m,\,n}(x)/U_{m,\,n}(x)=I_{k,\,n}(x)/U_{k,\,n}(x)=\lambda_n,$$
$$\varphi_{k,\,n}-\psi_{k,\,n}=\varphi_{m,\,n}-\psi_{m,\,n}=\delta_n,\;\forall k,m\in N,\; n=a,b,c. \tag{27}$$

Для активной и реактивной мощностей каждой фазы получим

$$P_n=\lambda_n I_n^2\cos\delta_n=1/\lambda_n U_n^2\cos\delta_n,$$

$$Q_n=\lambda_n I_n^2\sin\delta_n=1/\lambda_n U_n^2\sin\delta_n,\; n=a,b,c,$$

где

$$U_n^2 = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty} u_{k,\,n}^2,\ \ I_n^2 = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty} i_{k,\,n}^2,\ \ n = a, b, c.$$

Сравнив полученные мощности с ПМ S_m для трехфазной системы, т.е. определив разность между квадратом ПМ и квадратами суммарных активных и реактивных мощностей фаз, получим

$$\begin{gathered}
S_m^2 - (P_a + P_b + P_c)^2 - (Q_a + Q_b + Q_c)^2 = \\
= (\lambda_a^2 I_a^2 + \lambda_b^2 I_b^2 + \lambda_c^2 I_c^2)(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) - \\
-(\lambda_a I_a^2 \cos\delta_a + \lambda_b I_b^2 \cos\delta_b + \lambda_c I_c^2 \cos\delta_c)^2 - \\
-(\lambda_a I_a^2 \sin\delta_a + \lambda_b I_b^2 \sin\delta_b + \lambda_c I_c^2 \sin\delta_c)^2 = (\lambda_a^2 + \lambda_b^2)\, I_a^2 I_b^2 + \\
+(\lambda_a^2 + \lambda_c^2)\, I_a^2 I_c^2) + (\lambda_a^2 + \lambda_c^2)\, I_b^2 I_c^2 - 2\lambda_a \lambda_b I_a^2 I_b^2 \cos(\delta_a - \delta_b) - \\
-2\lambda_a \lambda_c I_a^2 I_c^2 \cos(\delta_a - \delta_c) - 2\lambda_b \lambda_c I_b^2 I_c^2 \cos(\delta_b - \delta_c).
\end{gathered}$$

После преобразований находим

$$\begin{gathered}
S_m^2 - (P_a + P_b + P_c)^2 - (Q_a + Q_b + Q_c)^2 = \\
= I_a^2 I_b^2 (\lambda_a - \lambda_b)^2 + I_a^2 I_b^2 4\sin^2((\delta_a - \delta_b)/2) + I_a^2 I_c^2 (\lambda_a - \lambda_c)^2 + \\
+ I_a^2 I_c^2 4\sin^2((\delta_a - \delta_c)/2) + I_b^2 I_c^2 (\lambda_b - \lambda_c)^2 + I_b^2 I_c^2 4\sin^2((\delta_b - \delta_c)/2) = \\
= (I_a^2 I_b^2 (\lambda_a - \lambda_b)^2 + I_a^2 I_c^2 (\lambda_a - \lambda_c)^2 + I_b^2 I_c^2 (\lambda_b - \lambda_c)^2) + \\
+ (I_a^2 I_b^2 4\sin^2((\delta_a - \delta_b)/2) + I_a^2 I_c^2 4\sin^2((\delta_a - \delta_c)/2) + \\
+ I_b^2 I_c^2 4\sin^2((\delta_b - \delta_c)/2)) = H_{\text{а}}^2 + H_{\text{ф}}^2. \qquad (28)
\end{gathered}$$

Следовательно, в случае неискажающего режима амплитудная составляющая мощности несимметрии (определяемая в классической теории мощности как разность между максимальной и арифметической ПМ) является математической характеристикой рассогласования величин отношения между модулями токов и напряжения для разных фаз. Фазная составляющая $H_{\text{ф}}$ мощности несимметрии, определяемая в классической теории мощности как разность между арифметической и геометрической ПМ, является математической характеристикой величины несовпадения разности углов для тока и напряжения в соответствующих фазах.

Равенство нулю $H_а$ и $H_ф$ в (28) достигается при выполнении условий

$$\lambda_a = \lambda_b = \lambda_c, \ \delta_a = \delta_b = \delta_c, \qquad (29)$$

где равенство углов между током и напряжением для разных фаз означает равенство коэффициентов мощностей для всех фаз. Но из условий (29) не следует выполнения условий (5) симметричности режима, а именно равенства амплитуд соответствующих гармоник для токов и напряжений, а также равенства разности межфазных углов значению 2π/3 или 4π/3 одновременно для всех гармоник. Более того, условия симметричности режима (5) могут не выполняться даже для синусоидальных токов и напряжений, что видно из соотношений (25).

Введем понятия идеального и идеального симметричного режимов.

Определение 1. Режим функционирования трехфазной системы назовем идеальным, если выполнены условия $D_а = 0$, $D_ф = 0$, $H_а = 0$, $H_ф = 0$.

Проанализируем идеальные режимы. При разложении токов и напряжений в ряд Фурье вида (26) для идеального режима выполняются условия (27) и (29), согласно которым с учетом (28) получаем

$$S_m^2 = S_A^2 = S_G^2 = (P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2 = P_\Sigma^2 + Q_g^2. \qquad (30)$$

Однако в этом случае не гарантируется выполнение условий симметричности режима (5), что позволяет сделать следующие выводы:

1. Мощность несимметрии как величина, характеризующая отклонение неискажающего (в том числе и идеального) режима от симметричного, не может быть определена из соотношений между известными вариантами понятий ПМ.

2. Потери мощности в несимметричном идеальном режиме определяются свойствами потребителя: при симметричной нагрузке будут возникать токи нулевой и(или) обратной последовательности.

Первый вывод подтверждается в случае идеального режима соотношениями (28) и (30), где не учитываются условия симметричности (5), которые могут нарушаться, как в случае, описываемом соотношениями (25).

Второй вывод свидетельствует о том, что несимметричность режима не всегда приводит к возникновению токов нулевой и обратной последовательностей, а величину дополнительных потерь мощности вследствие несимметричности режима следует определять с учетом состава потребителей. Однако при симметричной нагрузке, потребителями которой являются АД, возникают токи нулевой и обратной последовательностей. В АД несимметрия напряжения вызывает дополнительный нагрев и противодействующий вращательный момент, а количественная характеристика несимметрии напряжения (согласно стандарту ГОСТ 13109-97) оценивается такими показателями качества напряжения, как коэффициент несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям.

Следовательно, с технической точки зрения, режим, в котором для потребителей симметричной нагрузки не возникают дополнительные потери мощности, это симметричный режим, в котором для токов и напряжений отсутствуют составляющие обратной и нулевой последовательностей. Такой режим назовем идеальным симметричным.

Определение 2. Режим функционирования трехфазной системы назовем идеальным симметричным, если

1) режим является идеальным,

2) для токов и напряжений отсутствуют симметричные составляющие обратной и нулевой последовательностей.

Поскольку идеальный симметричный режим — частный случай идеального режима, для него выполняются условия (30), согласно которым ПМ является геометрической суммой суммарных активных и реактивных мощностей фаз. Если идеальный режим не является симметричным, то он содержит только часть общей ПМ идеального симметричного режима. Поэтому согласно теории мощности мощность несимметрии должна включать составляющие, описывающие отклонение идеального режима от идеального симметричного.

При выполнении условий (27) для неискажающего режима произвольные токи и напряжения близки по своим характеристикам к синусоидальному режиму. Поэтому для упрощения выкладок рассмотрим синусоидальный режим, токи и напряжения которого описываются соотношениями

$$u_a(x,t)=U_a\sin(\omega t+\varphi_a),\ i_a(x,t)=I_a\sin(\omega t+\varphi_a-\varphi)=\lambda U_a\sin(\omega t+\varphi_a-\varphi);$$

$$u_b(x,t)=U_b\sin(\omega t+\varphi_b),\ i_b(x,t)=I_b\sin(\omega t+\varphi_b-\varphi)=\lambda U_b\sin(\omega t+\varphi_b-\varphi);$$

$$u_c(x,t)=U_c\sin(\omega t+\varphi_c),\ i_c(x,t)=I_c\sin(\omega t+\varphi_c-\varphi)=\lambda U_c\sin(\omega t+\varphi_c-\varphi). \tag{31}$$

Пусть $U_a\neq U_b\neq U_c$, $U_i=\sqrt{(U_a^2+U_b^2+U_c^2)/3}$, $I_i=\sqrt{(I_a^2+I_b^2+I_c^2)/3}=\lambda U_i$. Тогда такой несимметричный синусоидальный режим является идеальным и для него запишем

$$P_a+P_b+P_c=3/2\lambda U_i^2\cos\varphi\,,$$

$$Q_a+Q_b+Q_c=3/2\lambda U_i^2\sin\varphi\,,$$

$$S_A=S_G=S_m=3/2\lambda U_i^2,$$

$$H_{\text{а}}=H_{\text{ф}}=D_{\text{а}}=D_{\text{ф}}=0.$$

Токи и напряжения произвольного синусоидального трехфазного режима можно представить в виде суммы симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей. Соотношения для токов $(i1_a, i1_b, i1_c)$ и напряжений $(u1_a, u1_b, u1_c)$ прямой последовательности имеют вид

$$\begin{aligned} &u1_a(x,t) = U1\sin(\omega t + \varphi 1), \ \ i1_a(x,t) = I1\sin(\omega t + \varphi 1 - \varphi); \\ &u1_b(x,t) = U1\sin(\omega t + \varphi 1 - 2\pi/3), \ \ i1_b(x,t) = I1\sin(\omega t + \varphi 1 - \varphi - 2\pi/3); \\ &u1_c(x,t) = U1\sin(\omega t + \varphi 1 - 4\pi/3), \ \ i1_c(x,t) = I1\sin(\omega t + \varphi 1 - \varphi - 4\pi/3); \end{aligned} \quad (32)$$

для токов $(i2_a, i2_b, i2_c)$ и напряжений $(u2_a, u2_b, u2_c)$ обратной последовательности —

$$\begin{aligned} &u2_a(x,t) = U2\sin(\omega t + \varphi 2), \ i2_a(x,t) = I2\sin(\omega t + \varphi 2 - \varphi); \\ &u2_b(x,t) = U2\sin(\omega t + \varphi 2 - 4\pi/3), \ i2_b(x,t) = I2\sin(\omega t + \varphi 2 - \varphi - 4\pi/3); \\ &u2_c(x,t) = U2\sin(\omega t + \varphi 2 - 2\pi/3), \ i2_c(x,t) = I2\sin(\omega t + \varphi 2 - \varphi - 2\pi/3); \end{aligned} \quad (33)$$

для токов $(i3_a, i3_b, i3_c)$ и напряжений $(u3_a, u3_b, u3_c)$ нулевой последовательности —

$$\begin{aligned} &u3_a(x,t) = U3\sin(\omega t + \varphi 3), \ i3_a(x,t) = I3\sin(\omega t + \varphi 3 - \varphi); \\ &u3_b(x,t) = U3\sin(\omega t + \varphi 3), \ i3_b(x,t) = I3\sin(\omega t + \varphi 3 - \varphi); \\ &u3_c(x,t) = U3\sin(\omega t + \varphi 3), \ i3_c(x,t) = I3\sin(\omega t + \varphi 3 - \varphi). \end{aligned} \quad (34)$$

Тогда можно составить систему уравнений

$$\begin{aligned} u_a(x,t) &= u1_a(x,t) + u2_a(x,t) + u3_a(x,t), \\ u_b(x,t) &= u1_b(x,t) + u2_b(x,t) + u3_b(x,t), \\ u_c(x,t) &= u1_c(x,t) + u2_c(x,t) + u3_c(x,t), \end{aligned} \quad (35)$$

которая всегда имеет решение. Длина вектора напряжения $(u_a(x,t), u_b(x,t), u_c(x,t))$ с учетом формул (31) и (32)—(35) определяется из выражения

$$\frac{1}{T}\int_0^T (u_a^2(x,t) + u_b^2(x,t) + u_c^2(x,t))\,dt = \frac{3}{2}U_i^2 = \frac{3}{2}(U1^2 + U2^2 + U3^2).$$

Тогда для активной мощности идеального режима получим

$$P_\Sigma(x) = \frac{1}{T}\int_0^T (u_a(x,t)\, i_a(x,t) + u_b(x,t)\, i_b(x,t) + u_c(x,t)\, i_c(x,t))\, dt =$$

$$= \frac{\lambda\cos\varphi}{T}\int_0^T (u_a^2(x,t) + u_b^2(x,t) + u_c^2(x,t))\, dt = \frac{3\lambda\cos\varphi}{2} U_i^2 =$$

$$= \frac{3\lambda}{2}(U1^2 + U2^2 + U3^2)\cos\varphi = P1(x) + P2(x) + P3(x), \qquad (36)$$

где $P1(x)$, $P2(x)$ и $P3(x)$ — активные мощности тока соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей. Аналогичные соотношения получаем и для реактивной мощности:

$$Q_g(x) = \frac{1}{T}\int_0^T (u_a(x,t)\, i_{a,\perp}(x,t) + u_b(x,t)\, i_{b,\perp}(x,t) + u_c(x,t)\, i_{c,\perp}(x,t))\, dt =$$

$$= \frac{\lambda\sin\varphi}{T}\int_0^T (u_a^2(x,t) + u_b^2(x,t) + u_c^2(x,t))\, dt = \frac{3\lambda\sin\varphi}{2} U_i^2 =$$

$$= \frac{3\lambda}{2}(U1^2 + U2^2 + U3^2)\sin\varphi = Q1(x) + Q2(x) + Q3(x), \qquad (37)$$

где $Q1(x)$, $Q2(x)$ и $Q3(x)$ — реактивные мощности тока соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Соотношения (36), (37) устанавливают правило разложения активной и реактивной мощностей идеального режима на составляющие, соответствующие симметричным составляющим тока и напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей. На их основании для ПМ идеального режима получим

$$S_i^2 = P_\Sigma^2 + Q_g^2 = (P1 + P2 + P3)^2 + (Q1 + Q2 + Q3)^2 . \qquad (38)$$

Из соотношения (38) можно выделить мощность идеального симметричного режима и геометрически связанную с ней оставшуюся часть мощности, которую обозначим $H1$. Мощность $H1$ связана с отклонением идеального режима от идеального симметричного, поэтому будем называть ее мощностью несимметрии идеального режима. Тогда зависимость (38) можно представить в виде

$$S_i^2 = P_\Sigma^2 + Q_g^2 = P1^2 + Q1^2 + H1^2 = P1^2 + Q1^2 + H1_P^2 + H1_Q^2,$$

где $H1_P^2 = (P2 + P3)^2 + 2\, P1(P2 + P3)$; $H1_Q^2 = (Q2 + Q3)^2 + 2\, Q1(Q2 + Q3)$.

Выводы

На основании результатов анализа структуры ПМ трехфазной системы установлено следующее.

1. Активные составляющие ПМ P_Σ и P_g отличаются на величину мощности искажения.

2. Реактивная мощность Q_g численно равна реактивной мощности всех фаз по Будяну, для определения которой используются только значения токов и напряжений, а произвольная генерация или потребление реактивной мощности характеризуются изменением тока или напряжения. Поэтому исчезает неоднозначность при определении величины реактивной мощности.

3. Для симметричных режимов ПМ S_m является геометрической суммой P_Σ и Q_g, а также амплитудной и фазной составляющих мощности искажения.

4. В случае произвольных режимов полная мощность S_m может быть представлена восемью геометрически связанными между собой составляющими: $S_m^2 = P1^2 + Q1^2 + H1_P^2 + H1_Q^2 + H_{\text{а}}^2 + H_{\text{ф}}^2 + D_{\text{а}}^2 + D_{\text{ф}}^2$.

5. При определении потерь энергии в случае несимметричных режимов необходимо учитывать состав потребителей.

It is proposed to consider power of the three-phase current as the power of the generator (source) placed in a certain point of the three-phase system. The complete power components have been determined for the symmetric and asymmetric periodic operations.

1. *Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. и др.* Баланс энергий в электрических цепях. — Киев : Наук. думка, 1992. — 312 с.
2. *Крогерис А. Ф., Решевиц К. К., Трейманис Э. П., Шинка Я. К.* Мощность переменного тока. — Рига : Физ.-энерг.ин-т Латв. АН, 1993. — 294 с.
3. *Чиженко А. И.* Обменные энергетические процессы в цепах вентильних полупроводниковых преобразователей. — Киев : Наук.думка, 2003. — 227 с.
4. *Leszek S. Czamecki*. Power Properties of Electrical Circuits and their Misinterpretations by the Instantaneous Reactive Power p-q Theory.//Proc. of XII International Simposium of Theoretical Electrical Engineering ISTET ’03. — Vol. II. — Warsaw, 2003. — P. 261—267.
5. *Винничук С. Д.* Мощность переменного тока. Новый взгляд. /Сборник тр. конф. «Моделирование — 2006». — Киев : ИПМЭ НАН Украины, 2006. — С. 161 — 164.
6. *Родькин Д. И., Коренькова Т. В.* Мгновенная мощность сигналов произвольной формы // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. — 2010 (12). — Вип. 4. — С. 10—21.
7. *Кизилов В. У., Светелик А. Д.* О понятии «реактивная мощность» // Енергетика та електрифікація. — 2005. — № 2. — С. 35—38.
8. *Жданов П. С.* Вопросы устойчивости электрических систем /Под ред. Л.А.Жукова. — М. : Энергия, 1979. — 456 с.

9. *Akagi H., Nabae A.* The p-q Theory in Three-phase Systems under Nonsinusoidal Conditions// Eurp. Trans. on Electric Power(ETEP). — 1993. — Vol. 3, No. 1. — P. 27—31.
10. *Агунов М. В.* Энергетические процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами и их эффективность. — Кишинев—Тольятти : МолдНИИТЭИ, 1997. — 84 с.
11. *Пухов Г. Е.* Теория мощности системы периодических многофазных токов // Электричество. — 1953. — № 2. — С. 56—61.

Поступила 26.09.11

ВИННИЧУК Степан Дмитриевич, д-р техн. наук, вед. науч. сотр. Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1977 г. окончил Черновицкий госуниверситет. Область научных исследований — разработка методов, моделей и программных средств для анализа распределительных систем сжимаемой и несжимаемой жидкостей, авиационные системы кондиционирования воздуха; системная противоаварийная частотная автоматика электроэнергетических систем.