Полная мощность трехфазной системы и стандарт IEEE 1459 ™–2010

ЦИЦИКЯН Г.Н.

Показано, что все известные выражения для полной мощности, в том числе рекомендуемое стандартом IEEE 1459, могут быть получены на основе метода неопределенных коэффициентов (метода Лагранжа). Рассмотрено, в чем заключается причина различий выражений для полной мощности.

Ключевые слова: *полная мощность, стандарт IEEE 1459, метод Лагранжа*

It is shown that all well-known expressions for apparent power, including that recommended in the IEEE Standard 1459, can be obtained using Lagrange's method of undetermined multipliers. The cause of differences in the expressions for apparent power is considered.

Key words: *apparent power, standard, Lagrange's method of undetermined multipliers*

Стандарт IEEE 1459^{TM} – 2010 [1], заменивший стандарт IEEE Std. 1459—2000, создавался на основе ряда публикаций между 2000 и 2010 гг. Некоторые положения стандарта, касающиеся определения полной мощности, были подготовлены публикациями и до 2000 г. Можно проследить определенную эволюцию представлений, отслеживаемую в статье А. Эммануэля, начиная с публикации от 1993 г. [2]. В указанной работе вывод выражения для полной мощности в частном случае, а именно $S = 3UI_{экв}$ (в оригинале $S = 3EI_e$), где U — действующее значение напряжения симметричного трехфазного источника относительно нулевого провода, занимает несколько страниц, хотя для определения эквивалентного тока в виде

$$I_{экв} = \sqrt{3^{-1}\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + \rho^2 I_N^2},$$

где ρ^2 равно r_N / r, r_N — резистивное сопротивление нейтрального провода; r — резистивное сопротивление проводов фаз, принятое одинаковым для всех проводов фаз, достаточно было бы, следуя оригиналу, приравнять потери в трехфазной системе с нулевым проводом $r\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + \rho^2 I_N^2\right)$ потерям определяемым выражением в обозначениях оригинала в виде $3r(S/V)^2$, где $S = VI$ и V — напряжение относительно нулевого провода.

Тогда максимальная активная мощность P_m, принимаемая за полную, была бы равна $P_m = 3VI_{экв}$. Однако в оригинале величина $I_{экв}$ записана как $\sqrt{3^{-1}\sum_{K=A,B,C} I_K^2}$.

В последующих публикациях А. Эммануэля прослеживается различие в оценках полной мощности для трехфазной системы. Наиболее показательной в этом смысле является статья [3], в которой выражение для мощности трехфазной системы с нулевым проводом отличается от полученного ранее в работе Кваде [4] и при $\rho = 1{,}0$ записывается в виде

$$P_m = 3U_{экв} I_{экв} =$$

$$= \sqrt{3^{-1}\left(\sum_{K=A,B,C,N} I_K^2\right)\left[12^{-1}\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2\right)\right]} =$$

$$= \sqrt{\left(\sum_{K=A,B,C,N} I_K^2\right)\left[4^{-1}\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2\right)\right]}. \quad (1)$$

У Кваде вместо квадратной скобки в (1) записана сумма $\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2\right)$ и в обоих случаях напряжение U_K отсчитывается относительно нулевого провода. В соответствии со статьей [5] полная мощность с учетом принятых здесь обозначений для трехфазной системы с нулевым проводом определяется выражением

$$S = \sqrt{\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + \rho^2 I_N^2\right)\left[4^{-1}\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2\right)\right]}.$$

В публикации [6] приведены два выражения для $U_{экв}$. Первое дано в виде

$$\sqrt{12^{-1}\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2\right)}, \quad (2)$$

второе — в виде, отличающемся от (2):

$$\sqrt{18^{-1}\left[\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2\right) + I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2\right]}. \quad (3)$$

Различия междлу (2) и (3), как сказано в [6], проистекают из двух подходов к определению полной мощности, во-первых, как максимальной мощности при ограничениях, связанных с инвариантностью потерь в передающей линии, во-вторых, как максимальной мощности, которую можно передать в условиях уравновешенной системы с синусоидальными токами и напряжениями при тех же потерях в изоляции и в активных сопротивлениях линии, как в том или ином конкретном случае. Также в [6] методом Лагранжа для максимума мощности P_m при ограничениях, налагаемых только на токи и обусловленные ими потери в линии, получено выражение для P_m в трехфазной линии с нулевым проводом, которое в наших обозначениях имеет вид

$$P_m(\rho^2) = 3I_{\text{экв}}U_{\text{экв}}(\rho^2) = \sqrt{\left(\sum_{K=A,B,C,N} I_K^2 + \rho^2 I_N^2\right)(3\rho^2+1)^{-1} \times \left[\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + \rho^2\left(U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{CA}^2\right)\right]}, \qquad (4)$$

где $\rho^2 = r_N / r$ (в оригинале ρ).

Подробный вывод выражения (4) изложен в [7]. Другое выражение в [6] получено косвенным способом с учетом потерь в изоляции, включая междуфазную, в виде

$$P_m(\rho^2,\xi) = P_m(\rho^2,q^2) = 3I_{\text{экв}}U_{\text{экв}} =$$

$$= 3\sqrt{3^{-1}\left(\sum_{K=A,B,C,N} I_K^2 + \rho^2 I_N^2\right) \times \frac{\left[3\sum_{K=A,B,C} U_K^2 + \xi\left(U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{CA}^2\right)\right]}{9(1+\xi)}} =$$

$$= 3\sqrt{3^{-1}\left(\sum_{K=A,B,C,N} I_K^2 + \rho^2 I_N^2\right) \times \frac{\left[\sum_{K=A,B,C} U_K^2 + q^2\left(U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{CA}^2\right)\right]}{3(1+3q^2)}}, \qquad (5)$$

где $q^2 = g_{\text{мф}} / g_{\text{ф}N} = \xi / 3$; $g_{\text{мф}}$ — проводимость междуфазной изоляции; $g_{\text{ф}N}$ — проводимости фаз относительно нулевого провода, принятые одинаковыми для всех фаз. Выражение (5) приведено также в [8]. Полагая $\xi = 1$, как это рекомендовано стандартом IEEE [1], имеем:

$$U_{\text{экв}}(\xi=1) = \sqrt{18^{-1}\left[\left(\sum_{K=A,B,C} U_K^2\right) + U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{CA}^2\right]}. \qquad (6)$$

Изложенное и побудило авторов в [6] сформулировать концепцию двух различных подходов к определению полной мощности. Вместе с тем, естественно предположить, что в зависимости от принятых ограничений для нахождения максимальной мощности неизбежно будут различия и в выражениях для полной мощности. Действительно, с учетом ограничений, связанных в основном с условиями для квадрата нормы напряжений, можно получить разные определения для P_m по методу Лагранжа. Для трехфазной трехпроводной системы известно выражение при фиксированных напряжениях:

$$P_m = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2\right)\left(U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{CA}^2\right)}. \qquad \text{(I)}$$

Для трехфазной системы с нулевым проводом при и условии инвариантности потерь в изоляции относительно нулевого провода получено выражение для P_m в виде

$$P_m = \sqrt{\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + \rho^2 I_N^2\right)\left(U_A^2+U_B^2+U_C^2\right)}. \qquad \text{(II)}$$

Для трехфазной системы с нулевым проводом без наложения ограничения на потери из-за несовершенства изоляции для величины P_m записано выражение (4). Наконец, с учетом инвариантности потерь из-за несовершенства изоляции записано выражение (5). Однако выражение (5) не было получено методом Лагранжа.

Покажем, что выражение (5) можно получить вполне строго методом Лагранжа в общем случае несинусоидального и несимметричного процесса. С этой целью представим токи и напряжения в виде многомерных векторов на основе соображений, изложенных в [4]. Запишем активную мощность трехфазного источника в виде суммы скалярных произведений векторов напряжения и токов в фазах:

$$P = \sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K \cdot \mathbf{I}_K. \qquad (7)$$

Определим ее максимум при следующих условиях (связях) между векторами:

$$\sum_{K=A,B,C,N} \mathbf{I}_K = 0; \qquad (8)$$

$$\sum_{K=A,B,C} \mathbf{I}_K^2 + \rho^2 \mathbf{I}_N^2 = I^2 = \mathrm{in\,var}; \qquad (9)$$

$$\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2 + q^2(\mathbf{U}_{AB}^2 + \mathbf{U}_{BC}^2 + \mathbf{U}_{CA}^2) = U^2 = \mathrm{in\,var}, \qquad (10)$$

где $\rho^2 = r_N / r$, как и ранее, и $q^2 = g_{\text{мф}} / g_{\text{ф}N}$.

Действуя, как и в [4], в соответствии с методом неопределенных коэффициентов составляем скалярную функцию

$$F = \sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K \mathbf{I}_K + \mathbf{\Lambda} \cdot \sum_{K=A,B,C,N} \mathbf{I}_K + \lambda\left(\sum_{K=A,B,C} \mathbf{I}_K^2 + \rho^2 \mathbf{I}_N^2 - I^2\right) + \mu\left(\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2 + q^2(\mathbf{U}_{AB}^2 + \mathbf{U}_{BC}^2 + \mathbf{U}_{CA}^2) - U^2\right)$$

и определим частные производные F по компонентам варьируемых величин (токов и напряжений). Умножая далее приравненные к нулю производные на соответствующие орты, получаем следующие уравнения в векторной форме:

$$\mathbf{U}_K + \mathbf{\Lambda} + 2\lambda \mathbf{I}_K = 0, \quad K = A,B,C; \qquad (11)$$

$$\mathbf{\Lambda} + 2\lambda\rho^2 \mathbf{I}_N = 0. \qquad (12)$$

Далее представим:

$$\mathbf{U}_{AB}^2 = \mathbf{U}_A^2 - 2\mathbf{U}_A \cdot \mathbf{U}_B + \mathbf{U}_B^2;$$

$$\mathbf{U}_{BC}^2 = \mathbf{U}_B^2 - 2\mathbf{U}_B \cdot \mathbf{U}_C + \mathbf{U}_C^2;$$

$$\mathbf{U}_{CA}^2 = \mathbf{U}_C^2 - 2\mathbf{U}_C \cdot \mathbf{U}_A + \mathbf{U}_A^2,$$

и запишем последний член выражения для F в виде

$$\mu\left[(1+2q^2)\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2 - 2q^2(\mathbf{U}_A \cdot \mathbf{U}_B + \mathbf{U}_B \cdot \mathbf{U}_C + \mathbf{U}_C \cdot \mathbf{U}_A - U^2\right].$$

Дифференцируя F по компонентам напряжений и принимая во внимание записанное выражение, получаем после преобразований третье уравнение:

$$\sum_{K=A,B,C} \mathbf{I}_K + 2\mu \sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K = -\mathbf{I}_N + 2\mu \sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K = 0. \qquad (13)$$

Уравнение (11) можно просуммировать по K и записать:

$$\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K + 3\mathbf{\Lambda} - 2\lambda \mathbf{I}_N = 0. \qquad (14)$$

Из (12)–(14) вытекает, что $[2\mu^{-1} - 2\lambda(3\rho^2+1)]\mathbf{I}_N = 0$. Отсюда $\mathbf{I}_N = 0$, $\mathbf{\Lambda} = 0$ и $\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K = 0$.

Тогда из уравнений (11) следует:

$$\mathbf{I}_{A,B,C} = g\mathbf{U}_{A,B,C}$$

и в соответствии с (9)

$$g^2 \sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2 = I^2. \qquad (15)$$

Перепишем левую часть уравнения (10) в таком виде:

$$(1+2q^2)\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2 - q^2(2\mathbf{U}_A \cdot \mathbf{U}_B + 2\mathbf{U}_B \cdot \mathbf{U}_C +$$

$$+ 2\mathbf{U}_C \cdot \mathbf{U}_A) = (1+2q^2)\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2 - q^2[\mathbf{U}_A(\mathbf{U}_B + \mathbf{U}_C) +$$

$$+ \mathbf{U}_B(\mathbf{U}_A + \mathbf{U}_C) + \mathbf{U}_C(\mathbf{U}_A + \mathbf{U}_B)] = (1+3q^2)\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2$$

в силу условия $\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K = 0$.

Поэтому уравнение (10) можно выразить только через сумму квадратов напряжений относительно нулевого провода:

$$(1+3q^2)\sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2 = U^2. \qquad (16)$$

Из (15) и (16) находим

$$g^2 = \frac{I^2(1+3q^2)}{U^2}$$

и тогда для P_m получаем:

$$P_m = g \sum_{K=A,B,C} \mathbf{U}_K^2 = \frac{I}{U}(1+3q^2)^{1/2} \frac{U^2}{(1+3q^2)} =$$

$$= UI(1+3q^2)^{-1/2}. \qquad (17)$$

С учетом (9) и (10) найдем:

$$P_m(\rho^2, q^2) = \sqrt{\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + \rho^2 I_N^2\right)(1+3q^2)^{-1} \times \left[\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + q^2(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)\right]}. \qquad (18)$$

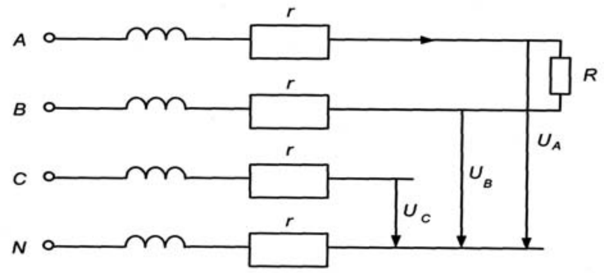
Полагая, как и в (5), $q^2 = \xi/3$, получаем следующее выражение:

$$P_m(\rho^2, \xi) = S(\rho^2, \xi) = \sqrt{\left(\sum_{K=A,B,C} I_K^2 + \rho^2 I_N^2\right)[3(1+\xi)]^{-1} \times}$$

$$\to \overline{\times\left[3\sum_{K=A,B,C}U_K^2+\xi(U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{CA}^2)\right]} \qquad (19)$$

совпадающее с (5) и рекомендованное стандартом IEEE [1], но найденное методом неопределенных коэффициентов.

Пусть к сети с нулевым проводом подключена несимметричная нагрузка в виде активного сопротивления R между фазами A и B (см. рисунок).



Ясно, что активная мощность равна U_{AB}^2/R, ток $I_A=I_B$, $I_C=0$, $I_N=0$.

В формуле (19) положим $\xi=1{,}0$, как в стандарте. Считаем, что система напряжений симметричная. Для полной мощности в соответствии с (19) при выбранном значении ξ имеем уравнение

$$S=\sqrt{2I_A^2\,6^{-1}(3U_{AB}^2+3U_{AB}^2)}=\sqrt{2}I_AU_{AB}=\sqrt{2}\frac{U_{AB}^2}{R}.$$

Поэтому коэффициент мощности равен $P/S=1/\sqrt{2}=0{,}707$. Этот же результат можно получить из (1). Действительно, имеем:

$$S=\sqrt{2}I_A\sqrt{4^{-1}\left[3\left(\frac{U_{AB}}{\sqrt{3}}\right)^2+3U_{AB}^2\right]}=\sqrt{2}\frac{U_{AB}^2}{R}.$$

Нетрудно проверить, что и по формуле (I) получается такой же результат.

Как показано в [6], разница в результатах вычислений по формулами (4) и (5) крайне незначительна. Однако стандарт IEEE 1459 отдает предпочтение формуле (5). Вместе с тем, до конца не ясно, какое значение приписывать ξ. Запишем отношение правых и левых частей выражений по формулам (4) и (19) или, что то же, по формуле (5):

$$\frac{P_m(\rho^2)}{P_m(\rho^2,\xi)}=\sqrt{\frac{3(1+\xi)(\rho^2+\sigma_1^2)}{(3\rho^2+1)(\xi+3\sigma_1^2)}},$$

где $\sigma_1^2=\dfrac{\sum\limits_{K=A,B,C}I_K^2}{U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{CA}^2}$.

Выражая суммы квадратов фазных и междуфазных напряжений при синусоидальном процессе через составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей системы фазных напряжений, найдем, что

$$\sigma_1^2=3^{-1}\frac{(U_{1ф}^2+U_{2ф}^2+U_0^2)}{(U_{1ф}^2+U_{2ф}^2)}=3^{-1}(1+\sigma^2),$$

где $\sigma=\dfrac{U_0}{(U_{1ф}^2+U_{2ф}^2)^{1/2}}$.

Выражая σ_1^2 через σ^2, для отношения найдем (см. формулу (35) в [6]):

$$\frac{P_m(\rho^2)}{P_m(\rho^2,\xi)}=\sqrt{\frac{3(1+\xi)(3\rho^2+1+\sigma^2)}{(3\rho^2+1)3(\xi+1+\sigma^2)}}=$$

$$=\sqrt{\frac{1+(3\rho^2+1)^{-1}\sigma^2)}{1+(1+\xi)^{-1}\sigma^2)}}, \qquad (20)$$

где ρ^2 — то же, что и ρ в [6].

При этом выясняется, что отношение (20) при произвольном выборе значения ξ в случае с $P_m(\rho^2,\xi)$ может оказаться больше единицы [9], что имеет место во всех случаях, когда $\xi\to\infty$, а ρ — конечно, либо ξ конечно, а ρ равно нулю. Отношение (20) равно единице, если выбраны $\rho=1{,}0$ и $\xi=3$. Однако максимальные мощности в (20) получены при разных ограничениях и принципиально различны. С тем же успехом можно принять $\rho^2=1/3$ и $\xi=1{,}0$, чтобы (20) не отличалось от единицы. При несимметричном синусоидальном процессе и принятом значении $\xi=1{,}0$ выражение (6) можно записать в виде

$$U_{экв}(\xi=1)=\sqrt{U_{1ф}^2+U_{2ф}^2+\frac{1}{2}U_0^2},$$

а для эквивалентного тока (см. (5)):

$$I_{экв}(\rho^2)=\sqrt{I_{1ф}^2+I_{2ф}^2+(1+3\rho^2)I_0^2}. \qquad (21)$$

В случае $\rho=1$ получим:

$$I_{экв}(\rho=1)=\sqrt{I_{1ф}^2+I_{2ф}^2+4I_0^2}.$$

Тогда

$$S^2(\rho^2=1,\ \xi=1)=9U_{экв}^2\,2I_{экв}^2=$$

$$=9(U_{1ф}^2+U_{2ф}^2+\frac{1}{2}U_0^2)(I_{1ф}^2+I_{2ф}^2+4I_0^2)=$$

$$= 9U_{1\text{ф}}^2 I_{1\text{ф}}^2 + 9U_{2\text{ф}}^2 I_{2\text{ф}}^2 + 9(2U_0^2 I_0^2) + 9U_{1\text{ф}}^2 (I_{2\text{ф}}^2 + 4I_0^2) +$$

$$+ 9U_{2\text{ф}}^2 (I_{1\text{ф}}^2 + 4I_0^2) + 9\frac{1}{2}U_0^2 (I_{1\text{ф}}^2 + I_{2\text{ф}}^2).$$

Обращает на себя внимание появление множителя 2 в записи третьего члена в этом выражении [10]. Заметим, что в случае выбора $\rho^2 = 1/3$ запись третьего члена по форме не отличалась бы от первых двух. В этом случае

$$S^2(\rho^2 = 1/3,\ \xi = 1) = 3U_{\text{экв}} I_{\text{экв}} =$$

$$= 3\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + P_2^2 + Q_2^2 + P_0^2 + Q_0^2 + D^2}, \qquad (22)$$

где

$$\left.\begin{aligned} &P_1 = U_{1\text{ф}} I_{1\text{ф}} \cos\varphi_1,\ Q_1 = U_{1\text{ф}} I_{1\text{ф}} \sin\varphi_1;\\ &P_2 = U_{2\text{ф}} I_{2\text{ф}} \cos\varphi_2,\ Q_2 = U_{2\text{ф}} I_{2\text{ф}} \sin\varphi_2,\\ &P_0 = U_0 I_0 \cos\varphi_0,\ Q_0 = U_0 I_0 \sin\varphi_0, \end{aligned}\right\} \qquad (23)$$

а величина D^2 определяется как

$$D^2 = S^2(\rho^2 = 1/3, \xi = 1) - P_1^2 - Q_1^2 - P_2^2 - Q_2^2 - P_0^2 - Q_0^2 =$$

$$= 9[U_{1\text{ф}}^2 (I_{2\text{ф}}^2 + 2I_0^2) + U_{2\text{ф}}^2 (I_{1\text{ф}}^2 + 2I_0^2) + \frac{1}{2}U_0^2 (I_{1\text{ф}}^2 + I_{2\text{ф}}^2)].$$

Изменим значение ρ^2 до 0,5. Тогда в соответствии с (21) $I_{\text{экв}}$ будет равно:

$$I_{\text{экв}}(\rho^2 = 0{,}5) = \sqrt{I_{1\text{ф}}^2 + I_{2\text{ф}}^2 + 2{,}5 I_0^2}. \qquad (24)$$

Записывая $U_{\text{экв}}(\xi)$ в соответствии с (5) и выражая эту величину через симметричные составляющие, получаем:

$$U_{\text{экв}}(\xi) = \sqrt{[9(1+\xi)]^{-1} \left[3 \sum_{K=A,B,C} U_K^2 + \xi(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)\right]} =$$

$$= \sqrt{U_{1\text{ф}}^2 + U_{2\text{ф}}^2 + (1+\xi)^{-1} U_0^2}. \qquad (25)$$

Тогда, полагая $\xi = 1{,}5$, найдем:

$$U_{\text{экв}}(1{,}5) = \sqrt{U_{1\text{ф}}^2 + U_{2\text{ф}}^2 + 2{,}5^{-1} U_0^2}; \qquad (26)$$

$$S^2(\rho^2 = 0{,}5;\ \xi = 1{,}5) =$$

$$= P_1^2 + Q_1^2 + P_2^2 + Q_2^2 + P_0^2 + Q_0^2 + D_1^2, \qquad (27)$$

где $D_1^2 \neq D^2$, но все остальные члены разложения соответствуют (23). Можно, наоборот, выбрать $\rho^2 = 2{,}0$ и тогда принять $\xi = 6$ и т.д. Подбор значений ρ^2 и ξ можно осуществлять, исходя из равенства $3\rho^2 + 1 = 1 + \xi$, и при этом сохранять для (20) единичное значение.

Вывод. Полная мощность трехфазной системы с учетом тех или иных ограничений может быть без исключения определена с использованием метода неопределенных коэффициентов (метода Лагранжа). Подтверждением этого служит полученное выражение для мощности, которое принято стандартом IEEE 1459, но выведено другим косвенным путем. Вместе с тем, вопрос о выборе тех или иных численных значений для констант, содержащихся в определениях полной мощности, нуждается в дополнительном обосновании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **IEEE** Standard Definition for the measurement of Electric Power Quantities under sinusoidal, nousinusoidal, balanced or unbalanced conditions (IEEE std. 1459TM – 2010). – IEEE Power and Energy Society, New York, 2010.

2. **Emanuel A.E.** On the Definition of Power Factor and Apparent Power in unbalanced polyphase circuits with sinusoidal voltage and currents. – IEEE Trans. on Power Delivery, July 1993, vol. 8, № 3.

3. **Emanuel A.E.** The Buchholz – Goodhue Apparent Power Definition: The practical approach for nonsinusoidal and unbalanced systems. – IEEE Trans. on Power Delivery, April 1998, vol. 13, № 2.

4. **Цицикян Г.Н.** Работы Кваде и некоторые замечания по понятиям электрической мощности. – Электричество, 2000, № 8.

5. **Emanuel A.E.** Apparent Power Definitions for three-phase systems. – IEEE Trans. on Power Delivery, July 1999, vol. 14, № 3.

6. **Willems J.L., Ghijselen J.A., Emanuel A.E.** The Apparent Power Concept and the IEEE standard 1459—2000. – IEEE Trans. on Power Delivery, April 2005, vol. 20, № 2.

7. **Цицикян Г.Н., Казначеев А.Н.** Полная мощность и эффективность использования электроэнергии. – Изв. АЭН РФ, 2011, № 2.

8. **Emanuel A.E.** Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the measurement of Electric Power Quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions. – IEEE Trans. on Industry Applications, May/June 2004, vol. 40, № 3.

9. **Willems J.L., Ghyselen J.A., Emanuel A.E.** Addendum to the Apparent Power Concept and the IEEE standard 1459—2000. — IEEE Trans. on Power Delivery, April 2005, vol. 20, N 2.

10. **Orts-Grau S., Munoz-Galeano N., Alfonso-Gil J.C. et al.** Discussion on Useless Active and Reactive Powers Contained in the IEEE Standard 1459. – IEEE Trans. on Power Delivery, April 2010, vol. 26, № 2.

[23.01.12]

Автор: ***Цицикян Георгий Николаевич*** *окончил электротехнический факультет Ереванского политехнического института в 1963 г. Докторскую диссертацию «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование» защитил в 1989 г. в Ленинградском электротехническом институте. Начальник ФГУП «ЦНИИ СЭТ», ученый секретарь научно-технического совета.*