

Ю. А. СИРОТИН, О. Г. ГРИБ, Д. А. ГАПОН, Т. С. ИЕРУСАЛИМОВА, С. В. ШВЕЦ

## УЧЕТ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ

Кількість споживачів з нелінійним та несиметричним навантаженням, які погіршують якість споживання електроенергії, постійно зростає. Зростає і кількість навантажень з підвищеними вимогами до якості постачання електроенергії. У цих ускладнених умовах споживання і постачання енергопостачальні організації повинні забезпечити кожного споживача електроенергією необхідної якості. Розглянуто єдиний підхід до вимірювання та компенсації неактивних складових повної потужності в умовах обліку величин кожної неактивної складової окремо в рамках розробки узагальненої теорії потужності.

**Ключові слова:** облік, якість, електроенергія, напруга, повна потужність, споживач, навантаження.

Количество потребителей с нелинейной и несимметричной нагрузкой, ухудшающих качество потребления электроэнергии, постоянно возрастает. Возрастает и число нагрузок с повышенными требованиями к качеству поставки электроэнергии. В этих усложненных условиях потребления и поставки энергоснабжающие организации должны обеспечить каждого потребителя электроэнергией требуемого качества. Рассмотрен единый подход к измерению и компенсации неактивных составляющих полной мощности в условиях учета величин каждой неактивной составляющей отдельно в рамках разработки обобщенной теории мощности.

**Ключевые слова:** учет, качество, электроэнергия, напряжение, полная мощность, потребитель, нагрузка.

The number of consumers with nonlinear and unbalanced load, degrading the quality of electricity consumption is constantly increasing. Increases the number of loads with higher requirements to the quality of supply of electricity. These complicating conditions of consumption and supply the energy supplying organization must provide each consumer with electricity of the required quality. Under asymmetric voltage to the minimization of losses and the creation of a balanced power mode becomes multiobjective. Improvement of the methods of compensation under asymmetric voltage requires a further development of the theory of power. The creation of a methodology of measurement and assessment will require knowledge of the magnitudes of each inactive component separately, which leads to the development of a unified approach to the measurement and compensation inactive components of full power and the development of a generalized theory of power. Only a 3-wire system with symmetrical voltage eliminating pulsations and summarization of the conductivities of the phases is equivalent to problem (power surges and power asymmetry of the conductivities of the phases are equal). Under asymmetric voltage, the power is different, their analysis for electrical systems requires the creation of vector mathematical models of energy processes unsymmetrical modes 3-phase systems. Generalized mathematical model for both the 3- and 4-wire electrical systems defines the General approach to the development of the theory of power.

**Keywords:** accounting, quality, power, voltage, full capacity, the consumer load.

**Введение.** Согласно ГОСТ 13109-97, как несинусоидальные искажения обусловлены суммарными нелинейными нагрузками потребителей, так и несимметрия напряжения обусловлена несимметричной нагрузкой потребителей. Кроме ухудшения качества электроэнергии, несимметричная нагрузка приводит к потерям в цепях поставщика, которые могут даже превышать потери от реактивной мощности. Так, суммарная нагрузка отдельных предприятий содержит 85...90% несимметричной нагрузки [1]. Однако расход энергии на несимметрию нагрузки (активно – реактивной) идет «мимо счетчика» – потребитель её не оплачивает. Эта энергия наносит ущерб и электроснабжающей организации (перегружая его сети) и оборудованию других потребителей (вызывая несимметрию напряжения).

**Анализ последних исследований и литературы.** Проблема несимметричного потребителя не нова, многопланова и включает организационные, научные, технические и экономические мероприятия по снижению несимметрии нагрузки [1–7]. Можно выделить следующие меры по уменьшению дополнительного потерь потребления энергии от несимметричной нагрузки: превентивные меры по симметризации нагрузки; политика дифференцированного расчета по показаниям измерительных счетчиков за потребляемую энергию; политика установки измерительных счетчиков и компенсирующих устройств.

Измерение и учет дополнительно потребляемой

электроэнергии от несимметричной нагрузки требует инструментальных средств. Обычно применяемые превентивные меры по симметризации нагрузки достаточно грубы, сводятся к перераспределению однофазных нагрузок и не обеспечены методикой расчета потерь от несимметрии нагрузки. Если в каждой фазе известны (измерены или рассчитаны) активная и реактивная мощность (или, что эквивалентно,  $\cos \phi$ ), то потери от несимметрии нагрузки можно оценить не привлекая дополнительные измерения. Для вновь подключаемого оборудования (однофазного или трехфазного) потери от несимметрии нагрузки можно оценить по его паспортным данным (активной мощности  $P$  и  $\cos \phi$ ).

**Цель статьи.** Учет неактивных составляющих полной мощности.

**Постановка проблемы.** Проблема возникает в том, что расход энергии на несимметрию нагрузки не учитывается и потребитель её не оплачивает, что наносит ущерб и электроснабжающей организации.

**Материалы исследований.** Метод расчета дополнительных потерь от несимметрии загрузки.

Предлагается методология и метод оценки потерь [8] от несимметрии нагрузки. Разработанная методика позволяет оценивать потери электрической энергии от несимметрии и реактивности нагрузки как по измеренным д.з. тока и напряжения так и превентивно по энергетическим паспортным данным.

В синусоидальном режиме энергетические процессы и их расчетные характеристики в точке подключения несимметричного потребителя к сети с

несимметричным напряжением полностью определяются 3-комплексами напряжения и тока в трехфазном сечении  $\langle a, b, c \rangle$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \cdot e^{j\psi_a} \\ U_b \cdot e^{j\psi_b} \\ U_c \cdot e^{j\psi_c} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \cdot e^{j\varphi_a} \\ I_b \cdot e^{j\varphi_b} \\ I_c \cdot e^{j\varphi_c} \end{bmatrix}$$

Стандартная комплексная мощность (СКМ) трехфазной нагрузки

$$\dot{S} = \dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c \quad (2)$$

определена как сумма комплексных мощностей фаз

$$\dot{S}_k = \dot{U}_k I_k^* = P_k + jQ_k = S_k e^{j(\psi_k - \varphi_k)} \quad (3)$$

$k \in \{a, b, c\}$

где  $P_k$ ,  $Q_k$  – активная и реактивная мощность,  $k$  – фазы.

Реальная и мнимая часть СКМ (2)

$$\dot{S} = P + jQ \quad (4)$$

определяет активную и реактивную мощность трехфазной нагрузки

$$P = \Re(\dot{S}) = P_a + P_b + P_c; \quad (5)$$

$$Q = \Im(\dot{S}) = Q_a + Q_b + Q_c$$

Модуль комплексной мощности  $S$  определяет геометрическую полную мощность трехфазной нагрузки

$$S_G = |\dot{S}| = |\dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6)$$

Произведение действующих величин (норм) трёхфазного тока  $|I|$  и напряжения  $|U|$  определяет полную мощность по *Buchholz'*

$$S_B = |U| |I| = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2} \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2} \quad (7)$$

Если нагрузка потребителя симметричная, то режим сбалансирован, геометрическая полная мощность равна полной мощности по *Buchholz'*

$$\underbrace{|U| \cdot |I|}_{S_B} = \underbrace{|UI^*|}_{S_G}, S_B = S_G \quad (8)$$

Определения комплексной (2), геометрической (6) и полной (7) мощности справедливы для любого несимметричного напряжения и любой несимметричной (активно-реактивной) нагрузки.

В точке подключения несимметричной нагрузки режим несбалансирован и справедливо ортогональное разложение 3-комплекса полного трехфазного тока

$$I = I_a + I_r + I_u \quad (9)$$

на энергетические компоненты: активный ток, неактивный ток и ток небаланса. Ортогональному разложению (9) соответствует квадратичное разложение для действующего значения – нормированное уравнение потерь на один Ом

$$|I|^2 = |I_a|^2 + \underbrace{|I_r|^2 + |I_u|^2}_{\text{дополнительные потери}} \quad (10)$$

При несимметричной нагрузке дополнительные потери определяются не только реактивным током, но и током небаланса. Ток небаланса  $I_u$ , увеличивая дополнительные потери, вызывает несимметричное падение напряжения, ухудшая качество электроэнергии.

Квадратичное разложение (10) эквивалентно уравнению мощности несбалансированного режима

$$S_B^2 = P^2 + \underbrace{Q^2 + D^2}_{\text{дополнительные потери}}, S_B^2 = S_G^2 + D^2 \quad (11)$$

Реактивная мощность  $Q$  и мощность небаланса  $D$  характеризуют дополнительные потери в несбалансированном режиме в терминах мощностей.

Коэффициент мощности (отношение активной мощности к полной мощности) определен отношением активного тока к полному току и должен быть вычислен согласно

$$\lambda^2 = \frac{P^2}{P^2 + Q^2 + D^2} = \frac{|I_a|^2}{|I_a|^2 + |I_r|^2 + |I_u|^2} \quad (12)$$

Если (активно-реактивная) нагрузка симметрична (эквивалентные проводимости фаз одинаковы), то режим сбалансирован и полная мощность равна геометрической мощности:

$$D = 0 \Leftrightarrow |I_u| = 0 \Leftrightarrow S_B = S_G.$$

В этом режиме коэффициент мощности определяется фазовым сдвигом  $\varphi_S$  между 3-комплексами тока и напряжения и равен отношению активной мощности к геометрической мощности

$$\cos \varphi_S = \frac{P}{S_G} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (13)$$

В несбалансированном режиме справедлива импликация

$$S_B \geq S_G \Rightarrow \lambda < \cos \varphi_S.$$

Для полной мощности по *Buchholz'* введем коэффициенты активной, неактивной и несбалансированной мощности [9, 10]:

$$\lambda^2 = \lambda_P^2 = P^2/S_B^2, \lambda_Q^2 = Q^2/S_B^2, \lambda_D^2 = D^2/S_B^2 \quad (14)$$

Из (11) следует нормированное уравнение мощности

$$\lambda_p^2 + \lambda_Q^2 + \lambda_D^2 = 1 \quad (15)$$

Тройка  $(\lambda_p^2, \lambda_Q^2, \lambda_D^2)$  безразмерных величин оценивает вклад активной, реактивной мощностей и мощности небаланса нагрузки в полную мощность.

Комплексные мощности фаз и уравнение мощности. При любом напряжении геометрическая мощность по определению (6) выражается через комплексные мощности фаз. Подключая свое оборудование, потребитель естественно рассчитывает на симметричное напряжение.

Покажем в [8], что если 3-комплекс напряжения симметричен

$$U = \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{e^{j\varphi_U} U}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^* \\ \alpha \end{bmatrix} = e^{j\varphi_U} |U| e \quad (16)$$

где  $e$  – орт прямой последовательности, то и остальные компоненты уравнения мощности (11) можно выразить через комплексные мощности фаз  $\dot{S}_a, \dot{S}_b, \dot{S}_c$ .

Из (16) следует, что при симметричном напряжении действующие значения напряжений в фазах одинаковы  $U_k = |\dot{U}_k| = |U|/\sqrt{3}$ . Для модуля комплексной мощности имеем

$$S_k = |\dot{S}_k| = |\dot{U}_k| |I_k^*| = I_k \cdot U_k = I_k \cdot |U|/\sqrt{3}, \quad k \in \{a, b, c\}. \quad (17)$$

Тем самым при симметричном напряжении

$$|\dot{I}_k| = \frac{|\dot{S}_k|}{|\dot{U}_k|} = \frac{\sqrt{3} |\dot{S}_k|}{|U|}, \quad k \in \{a, b, c\}. \quad (18)$$

Тогда квадрат нормы 3-комплекса полного тока равен

$$|I|^2 = \frac{3}{|U|^2} \sum_k I_k^2 = \frac{3}{|U|^2} \sum_k |\dot{S}_k|^2 \quad (19)$$

Умножая тождество (19) на  $|U|^2$  получим

$$|I|^2 |U|^2 = 3(|\dot{S}_a|^2 + |\dot{S}_b|^2 + |\dot{S}_c|^2). \quad (20)$$

Тем самым, при симметричном напряжении квадрат полной мощности выражается через комплексные мощности фаз

$$S_B^2 = 3(|\dot{S}_a|^2 + |\dot{S}_b|^2 + |\dot{S}_c|^2) \quad (21)$$

и равен утроенной сумме квадратов модулей комплексных мощностей фаз.

Цепочка преобразований для вектора мощности небаланса

$$D = I \times U = \begin{bmatrix} \dot{I}_b \dot{U}_c - \dot{I}_c \dot{U}_b \\ \dot{I}_c \dot{U}_a - \dot{I}_a \dot{U}_c \\ \dot{I}_a \dot{U}_b - \dot{I}_b \dot{U}_a \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{e^{j\varphi_U} U}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \alpha \dot{I}_b - \alpha^* \dot{I}_c \\ \dot{I}_c - \alpha \dot{I}_a \\ \alpha^* \dot{I}_a - \dot{I}_b \end{bmatrix} = \frac{e^{j\varphi_U} U}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \alpha U \dot{I}_b - \alpha^* U \dot{I}_c \\ (\alpha^* U \dot{I}_c - U \dot{I}_a) \alpha \\ (U \dot{I}_a - \alpha U \dot{I}_b) \alpha^* \end{bmatrix}$$

при симметричном напряжении (16) дает

$$D = e^{j2\varphi_U} \begin{bmatrix} U_b^* \dot{I}_b - U_c^* \dot{I}_c \\ (U_c^* \dot{I}_c - U_a^* \dot{I}_a) \alpha \\ (U_a^* \dot{I}_a - U_b^* \dot{I}_b) \alpha^* \end{bmatrix} \quad (22)$$

Так как

$$U^* = \begin{bmatrix} U_a^* \\ U_b^* \\ U_c^* \end{bmatrix} = \frac{e^{-j\varphi_U}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} U \\ \alpha U \\ \alpha^* U \end{bmatrix},$$

то для комплексно-сопряженного вектора мощности небаланса получим

$$D^* = I^* \times U^* = e^{-j2\varphi_U} [(\dot{S}_b - \dot{S}_c), (\dot{S}_c - \dot{S}_a) \alpha^*, (\dot{S}_a - \dot{S}_b) \alpha]. \quad (23)$$

Квадрат нормы вектора мощности небаланса равен

$$D^2 = D D^* = |D|^2 = |\dot{S}_b - \dot{S}_c|^2 + |\dot{S}_c - \dot{S}_a|^2 + |\dot{S}_a - \dot{S}_b|^2. \quad (24)$$

Из уравнения мощности (12) следует квадратичное разложение полной мощности при симметричном напряжении через комплексные мощности фаз

$$\begin{aligned} 3(|\dot{S}_a|^2 + |\dot{S}_b|^2 + |\dot{S}_c|^2) &= \underbrace{3(|\dot{S}_a|^2 + |\dot{S}_b|^2 + |\dot{S}_c|^2)}_{\text{полная мощность}} \\ &= \underbrace{|\dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c|^2}_{\text{геометрическая мощность}} + \\ &+ \underbrace{|\dot{S}_b - \dot{S}_c|^2 + |\dot{S}_c - \dot{S}_a|^2 + |\dot{S}_a - \dot{S}_b|^2}_{\text{мощность небаланса}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Раскрыв квадраты можно убедиться в справедливости полученного тождества.

Покажем, что и полная мощность (21) и мощность небаланса (24) могут быть представлены суммой двух компонент, отдельно обусловленных активными и реактивными проводимостями фаз.

Так как

$$|\dot{S}_k - \dot{S}_n|^2 = |(P_k - P_n) + j(Q_k - Q_n)|^2 = (P_k - P_n)^2 + (Q_k - Q_n)^2,$$

то, обозначая

$$P_D^2 = (P_b - P_c)^2 + (P_a - P_c)^2 + (P_a - P_b)^2, \quad (26)$$

$$Q_D^2 = (Q_b - Q_c)^2 + (Q_a - Q_c)^2 + (Q_a - Q_b)^2 \quad (27)$$

для мощности небаланса (24), получим

$$D^2 = P_D^2 + Q_D^2, \quad (28)$$

Так же для мощности по Buchholz' (21) имеем

$$S_B^2 = 3(|\dot{S}_a|^2 + |\dot{S}_b|^2 + |\dot{S}_c|^2) = P_B^2 + Q_B^2, \quad (29)$$

где обозначено:

$$\begin{aligned} P_B^2 &= 3(P_a^2 + P_b^2 + P_c^2), \\ Q_B^2 &= 3(Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2). \end{aligned} \quad (30)$$

Уравнение мощности (25) при симметричном напряжении приводит к системе двух независимых уравнений, обусловленных:

- чисто активными элементами нагрузки

$$P_B^2 = P^2 + P_D^2 \quad (31)$$

- чисто реактивными элементами нагрузки

$$Q_B^2 = Q^2 + Q_D^2 \quad (32)$$

Полная мощность реактивных элементов нагрузки имеет две квадратические составляющие, которые обусловлены симметрией и несимметрией этих реактивных элементов.

**Результаты исследований.** Методика оценки дополнительных потерь по паспортным данным. На этапе проектирования нового энергетического объекта или реконструкции уже эксплуатируемого расчетным путем требуется оценить эффективность принятых решений по многим параметрам. Вышеизложенный метод позволяет разработать методику оценки дополнительных потерь вновь вводимого несимметричного оборудования.

Пусть к 3-фазному симметричному источнику подключаются три однофазные нагрузки с разными номинальными данными ( $P_{НОМ}, \cos \varphi_{НОМ}$ ):

- разными активными мощностями

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{НОМa}, \quad P_2 = P_{НОМb}, \quad P_3 = P_{НОМc}, \\ P_1 &\neq P_2 \neq P_3; \end{aligned}$$

- разными однофазными коэффициентами мощности

$$\begin{aligned} \cos \varphi_1 &= \cos \varphi_{НОМa}, \quad \cos \varphi_2 = \cos \varphi_{НОМb}, \\ \cos \varphi_3 &= \cos \varphi_{НОМc}; \\ \cos \varphi_1 &\neq \cos \varphi_2 \neq \cos \varphi_3. \end{aligned}$$

Тогда комплексные мощности в фазах

$$\dot{S}_k = P_k(1 + j \operatorname{tg} \varphi_k); \quad |\dot{S}_k|^2 = P_k^2 / \cos^2 \varphi_k. \quad (33)$$

Согласно (33), для кажущей мощности по Buchholz' (21), и геометрической мощности (6) справедливы формулы

$$S_B^2 = 3 \sum_{k=1}^3 P_k^2 / \cos^2 \varphi_k \quad (34)$$

$$S_G^2 = \underbrace{\left( \sum_{k=1}^3 P_k \right)^2}_P + \underbrace{\left( \sum_{k=1}^3 P_k \operatorname{tg} \varphi_k \right)^2}_Q. \quad (35)$$

Мощность небаланса

$$D^2 = \sum_{k>n}^3 \left[ (P_k - P_n)^2 + (P_k \operatorname{tg} \varphi_k - P_n \operatorname{tg} \varphi_n)^2 \right]. \quad (36)$$

Для коэффициентов мощностей (14), которые оценивает вклад активной и реактивной мощностей и мощности небаланса нагрузки в полную мощность имеем

$$\begin{aligned} \lambda^2 &= \lambda_P^2 = \frac{P^2}{S_B^2} = \frac{\left( \sum_{k=1}^3 P_k \right)^2}{3 \sum_{k=1}^3 P_k^2 / \cos^2 \varphi_k}; \\ \lambda_Q^2 &= \frac{Q^2}{S_B^2} = \frac{\left( \sum_{k=1}^3 P_k \operatorname{tg} \varphi_k \right)^2}{3 \sum_{k=1}^3 P_k^2 / \cos^2 \varphi_k}; \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \lambda_D^2 &= \frac{D^2}{S_B^2} = \\ &= \frac{\sum_{k>n}^3 \left[ (P_k - P_n)^2 + (P_k \operatorname{tg} \varphi_k - P_n \operatorname{tg} \varphi_n)^2 \right]}{3 \sum_{k=1}^3 P_k^2 / \cos^2 \varphi_k}. \end{aligned} \quad (38)$$

Кроме того для стандартной величины

$$\cos \varphi_S = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^3 P_k}}{\sqrt{\left( \sum_{k=1}^3 P_k \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^3 P_k \operatorname{tg} \varphi_k \right)^2}}. \quad (39)$$

Рассмотрим два крайних случая:

- небаланс активных мощностей;
- фазный небаланс.

Если имеет место только небаланс активных мощностей, т.е.

$$\cos \varphi_a = \cos \varphi_b = \cos \varphi_c = \cos \varphi \quad (40)$$

то компоненты уравнения мощности (25) упрощаются:

$$S_B^2 = \frac{3(P_a^2 + P_b^2 + P_c^2)}{\cos^2 \varphi} \quad (41)$$

$$S_G^2 = \frac{(P_a + P_b + P_c)^2}{\cos^2 \varphi} \quad (42)$$

$$D^2 = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \sum_{k>n}^3 (P_k - P_n)^2. \quad (43)$$

Можно проверить, что справедливо уравнение мощности

$$S_B^2 = S_G^2 + D^2.$$

Коэффициенты мощностей

$$\lambda^2 = \frac{\cos^2 \varphi \left( \sum_{k=1}^3 P_k \right)^2}{3 \sum_{k=1}^3 P_k^2}, \quad \lambda_D^2 = \frac{\sum_{k>n}^3 (P_k - P_n)^2}{3 \sum_{k=1}^3 P_k^2}.$$

При фазном небалансе однофазные нагрузки имеют одинаковые номинальные активные мощности

$$P = P_1 = P_2 = P_3 = P_{\text{НОМ}},$$

но разные коэффициенты мощности в фазах, тогда

$$\cos \varphi_a \neq \cos \varphi_b \neq \cos \varphi_c$$

$$\Rightarrow \dot{S}_k = P(1 + j \operatorname{tg} \varphi_k) \Rightarrow |\dot{S}_k|^2 = P^2 / \cos^2 \varphi_k.$$

Для кажущейся мощности по *Buchholz'*

$$S_B^2 = 3P^2 \sum_{k=1}^3 1/\cos^2 \varphi_k = 3P^2 (3 + \sum_{k=1}^3 \operatorname{tg}^2 \varphi_k).$$

Геометрическая мощность и мощность небаланса

$$S_G^2 = P^2 \left[ 9 + \left( \sum_{k=1}^3 \operatorname{tg} \varphi_k \right)^2 \right];$$

$$D^2 = P^2 \sum_{k>n}^3 (\operatorname{tg} \varphi_k - \operatorname{tg} \varphi_n)^2.$$

Что для коэффициентов мощностей дает

$$\lambda^2 = \frac{P^2}{S_B^2} = \frac{1}{1 + 1/3 \sum_{k=1}^3 \operatorname{tg}^2 \varphi_k},$$

$$\cos^2 \varphi_S = \frac{P^2}{S_G^2} = \frac{1}{1 + 1/9 \sum_{k=1}^3 \operatorname{tg}^2 \varphi_k}.$$

Пример расчета. Три однофазных асинхронных двигателя (АД) соединены звездой и присоединены к симметричной четырехпроводной сети. Номинальные данные [11] приведены в нижеследующей таблице.

Таблица 1 – Номинальные данные АД

Фазы	A	B	C
Тип АД	4A112M2Y3	4A132M2Y3	4A160S2Y3
$P_{\text{НОМ}}$ , кВт	7,5	11	15
$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	0,88	0,9	0,91

Коэффициенты мощностей вычислены по формулам (36)- (39):

$$\lambda = \lambda_p = 0,894, \lambda_Q = 0,332,$$

$$\lambda_D = 0,3, \cos \varphi_S = 0,937$$

При коэффициенте мощности, который рассчитан при условии, что нагрузка симметрична  $\cos \varphi_S = 0,937$ , истинный коэффициент мощности (так как нагрузка несимметрична)  $\lambda = \lambda_p = 0,894$ . При этом, 11% энергии, подводимой к такой несимметричной нагрузке определяют 20% от общих потерь. Дополнительные потери составляют 20%. Из них 9% обусловлены ее несимметрией.

**Выводы.** Таким образом, при симметричном напряжении все компоненты уравнения мощности несбалансированного режима можно выразить через комплексные мощности фаз. Это позволяет по измерениям активных и реактивных мощностей в каждой фазе рассчитать дополнительные потери от несимметрии активно-реактивных элементов нагрузки

и симметрии реактивных элементов нагрузки. Предложенная методика позволяет оценить дополнительные потери от несимметрии эквивалентных активных и реактивных элементов вновь подключаемого электрооборудования, так и от симметрии эквивалентных реактивных элементов вновь подключаемого электрооборудования.

#### Список литературы

1. Грив О. Г. Качество электрической энергии. Том 3. Методы и средства повышения качества электрической энергии: Монография ПП «Граф-Икс». Харьков, 2014. – 292 с.
2. Анчарова Т. В. Определение допустимой несимметрии нагрузок в системах электроснабжения / Т. В. Анчаров., М. В. Былкин, Е. Ю. Сафонова // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – № 2-3. – С. 104-105.
3. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах.– М.: Энергоиздат.– 1981. – 200 с.
4. Железко Ю. С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко // Электричество. – 1992. – № 5. – С. 6-12.
5. Минц М. Я., Чинков В. Н., Грив О. Г. Комплексный метод одновременного симметрирования токов, уравнивания фазных напряжений и компенсации реактивной мощности трехфазных сетей / М. Я. Минц // Электричество. – 1993. – № 12. – С. 7-10.
6. Минц М. Я. Симметрирование системы токов трехфазной сети / Минц М. Я., В. Н. Чинков, О. Г. Грив // Энергетика. Изв. высш. учебн. зав. – 1984. – №10. – С. 16-20.
7. Милых А. Н. Симметрирование однофазных нагрузок в трехфазных сетях / Милых А. Н., Шиддовский А. К., Кузнецов В. Г. // Киев: Наукова думка. – 1973. – 219 с.
8. Сиротин Ю. А. Расчёт дополнительных потерь от несимметрии нагрузки / Ю. А. Сиротин // Тр. XXXIX Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием "Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений" (Москва, МЭИ (ТУ), 16-20 ноября 2009 г.). Том 1. М.: Технетика. – 2009. – С. 29-40.
9. Сиротин Ю. А. Сбалансированная и разбалансированная составляющие трёхфазного тока интерфейса "поставщик-потребитель" / Ю. А. Сиротин // Электрика.– 2008. – № 10. – С. 16–22.
10. Сиротин Ю. А. Качество энергоснабжения и энергопотребления в разбалансированной трёхфазной системе / Ю. А. Сиротин // Электрика: Москва. – 2009. – № 6. – Ч.1.– С. 22-26.
11. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. // Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

#### References (transliterated)

1. Gryb, O. G. Power quality: Methods and means of improving the quality of electrical energy Monograph "Graph-X". Kharkov: 2014. Print.
2. Ancharova, T. V., M. V. Belkin, E. Y. Safonova *Determination of permissible unbalance of the loads in power systems* Electrician, 1998. No 2-3. 104-105. Print.
3. Zelezko, Yu. S. Compensation of reactive power in complex power systems. – Moscow : Energoizdat. 1981. Print.
4. Zelezko, Yu. S. Strategy to reduce losses and improve power quality in electric networks. Electricity. 1992. No. 5. 6-12. Print.
5. Mints, M. Y., V. N. Chinkov and O. G. Gryb Complex method of simultaneous balancing current, the balancing of the phase voltages and reactive power compensation three-phase networks Electricity. 1993. No 12. 7-10. Print.
6. Mints, M. Y., V. N. Chinkov and O. G. Gryb *Balancing system currents a three-phase network* Power. 1984. No. 10. 16-20. Print.
7. Miles, A. N. et. al. *Balancing single-phase loads in three-phase networks* Kiev: Naukova Dumka. 1973. Print.
8. Sirotnin, Yu. A. Calculation of additional losses from asymmetry of the load Proc. XXXIX all-Russian. scientific.-pract. Conf. with int.

- participation "improving the efficiency of electricity sector of the consumers in the context of resource constraints" (Moscow, MPEI (TU), 16-20 November 2009). Vol. 1. Moscow : Tekhnika. 2009. 29-40. Print.
9. Sirotin, Yu. A "Balanced and unbalanced components of the three-phase current interface "supplier-consumer" Electrician. 2008. No. 10. 6-22. Print.
10. Sirotin, Yu. A The quality of energy supply and consumption in unbalanced three-phase system Electrician: Moscow – 2009. No. 6. Vol. 1. 22-26. Print.
11. Neklipaev, B. N., I. P. Kryuchkov *Electrical part of power plants and substations. Reference materials for course and diploma, Proektirovanie* Textbook. textbook for universities, 4th ed, Rev. and extra - Moscow : Energoatomizdat, 1989. Print.

Поступила (received) 17.05.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Учет неактивных составляющих полной мощности / Ю. А. Сиротин, О. Г. Гриб, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, С. В. Швец** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 42 (948). – С. 71–76. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2411-3441.

**Учет неактивных составляющих полной мощности / Ю. А. Сиротин, О. Г. Гриб, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, С. В. Швец** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 42 (948). – С. 71–76. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2411-3441.

**Account inactive components of full power / Yu. O. Sirotin, O. G. Gryb, D. A. Gapon, T. S. Ierusalimova, S. V. Shvets** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 42 (948). – P. 71–76. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2411-3441.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Сиротин Юрий Александрович** – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры автоматизации и кибербезопасности энергосистем.

**Сіротін Юрій Олександрович** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

**Sirotin Yuri Aleksandrovich** – Doctor of technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of Department of automation and cybersecurity of electric power systems.

**Гриб Олег Герасимович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой автоматизации и кибербезопасности энергосистем.

**Гриб Олег Герасимович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

**Gryb Oleg Gerasimovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department automation and cybersecurity of electric power systems.

**Гапон Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры автоматизации и кибербезопасности энергосистем.

**Гапон Дмитро Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

**Gapon Dmitry Anatolyevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Department of automation and cybersecurity of electric power systems.

**Иерусалимова Татьяна Сергеевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры автоматизации и кибербезопасности энергосистем.

**Іерусалімова Тетяна Сергіївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем

**Ierusalimova Tatiana Sergeevna** – Candidate of technical Sciences, National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior lecturer of Department of automation and cybersecurity of electric power systems.

**Швец Сергей Викторович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры автоматизации и кибербезопасности энергосистем.

**Швец Сергій Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

**Shvets Sergey Viktorovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Department of automation and cybersecurity of electric power systems.