

**Ю.А. СИРОТИН**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харків

## **НЕУРАВНОВЕШЕННЫЙ И НЕСБАЛАНСИРОВАННЫЙ РЕЖИМЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ЦЕПИ**

Наряду с неуравновешенным режимом для несинусоидальных процессов введен несбалансированный режим. Показано, как эти режимы определяются при синусоидальных процессах через комплексные мощности. Получены два дуальных уравнения комплексных мощностей для рассматриваемых режимов.

**Ключевые слова:** мгновенные и комплексные степени, пульс и несбалансированный режим, мощность уравнений, трехфазные четырехпроводные цепи.

В многофазной цепи с симметричными синусоидальными напряжениями и токами (в симметричном режиме) мгновенная мощность (ММ) не имеет переменной (пульсирующей) компоненты – режим *уравновешен* [1]. В реальной ситуации нарушение, как симметрии напряжений, так и симметрии токов приводит к пульсации ММ. Режим (синусоидальный или несинусоидальный) *неуравновешен*, если ММ имеет колебательную (пульсирующую) компоненту.

Мгновенная мощность (в многофазной цепи определяется как скалярное произведение векторов мгновенных напряжений и токов) не полностью определяют характер потока энергии. В трехфазной цепи *векторная* ММ (векторное произведение векторов мгновенных фазных напряжений и токов) дополнительно характеризует энергетические процессы. Векторная ММ интерпретируется как *неактивная мгновенная мощность*. Если *неактивная* ММ имеет колебательную составляющую – режим *несбалансирован*.

В многофазной цепи процессы синусоидального режима определены векторами комплексных действующих величин (*д.в.*) тока и напряжения, которые определяют *комплексные мощности* (КМ) сбалансированного и несбалансированного режимов. Стандартная КМ определяется как комплексное скалярное произведение (СП) векторов комплексных *д.в.* напряжений и токов. *Векторное* произведение (ВП) векторов комплексных *д.в.* напряжений и токов определяет – комплексный вектор мощности небаланса.

© Сиротин Ю.А., 2012

Покажем, что квадратичное разложение полной (кажущейся) мощности на активную и реактивную мощности при несбалансированном синусоидальном режиме должно быть дополнено мощностью небаланса, а мощность пульсаций ММ входит в другое уравнение мощности. В работе получены формулы представления скалярной и векторной ММ через введенные комплексные мощности.

### Уравновешенный и сбалансированный режим

При измерении напряжения в сечении  $\langle a, b, c \rangle$  относительно нейтрали 4-проводной цепи (рис. 1) ММ определена как

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = \mathbf{i}^* \mathbf{u} \quad (1)$$

где  $\bullet$  – знак транспонирования.

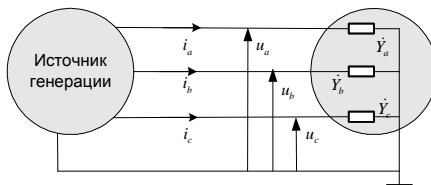


Рисунок. Четырехпроводная цепь

В каждый момент времени ММ равна *скалярному произведению*, которое вычисляется как произведение  $\mathbf{i}^* \mathbf{u}$  вектор строки мгновенных значений (м.з.) тока на вектор столбец м.з напряжения

$$\mathbf{u}(t) = (u_a(t), u_b(t), u_c(t))^* \quad , \quad \mathbf{i} = (i_a(t), i_b(t), i_c(t))^* \quad (2)$$

Полагая, что процессы периодические, можно корректно определить среднее ММ и выделить переменную составляющую

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt, \quad p(t) = \bar{p} + \tilde{p}(t) \quad (3)$$

В общем случае  $\tilde{p} = p(t) - \bar{p} \neq 0$  и режим *неуравновешен*. Симметричный режим *уравновешен*. Обратное утверждение не верно. Симметричный режим может быть обеспечен и при несимметричной нагрузке. Так, схема Штейнитца подключения одноплечевой нагрузки несимметрична, однако обеспечивает симметричный режим [2].

ММ – скалярная величина не единственная мгновенная характеристика наблюдаемого энергетического процесса. Уточняющую характеристику энергетических процессов дает *векторная ММ* (ВП векторов мгновенных фазных напряжений и токов) [3].

$$\mathbf{q} = \mathbf{u} \times \mathbf{i} = [u_b i_c - u_c i_b \quad u_c i_a - u_a i_c \quad u_a i_b - u_b i_a]^T. \quad (4)$$

Подобно (3) можно выделить векторную постоянную и переменную составляющие  $\mathbf{q} = \mathbf{q}(t) = \bar{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}}(t)$ . Режим, при котором векторная ММ не имеет переменной составляющей  $\tilde{\mathbf{q}} = \tilde{\mathbf{q}}(t) \equiv 0$  будем называть *сбалансированным* режимом. Векторная ММ интерпретируется как *неактивная* ММ. Чтобы подчеркнуть это скалярную ММ называют *активной* ММ. В каждый момент времени справедливо тождество [4]

$$[\mathbf{u} \times \mathbf{i}]^T [\mathbf{u} \times \mathbf{i}] = \begin{vmatrix} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) & (\mathbf{u} \cdot \mathbf{i}) \\ (\mathbf{u} \cdot \mathbf{i}) & (\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}) \end{vmatrix} \quad (5)$$

Тождество (5) дает *уравнение мощности* для мгновенных величин [3].

$$s^2(t) = p^2(t) + q^2(t). \quad (6)$$

Здесь использованы стандартные обозначения для: скалярных квадратов векторов *м.з.* напряжений и токов

$$u^2(t) = |\mathbf{u}(t)|^2 = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}), \quad i^2(t) = |\mathbf{i}(t)|^2 = (\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}); \quad (7.a)$$

квадратов мгновенных мощностей: активной, неактивной, и полной

$$p^2(t) = |(\mathbf{i} \cdot (\mathbf{u}(t)))|^2, \quad q^2(t) = \mathbf{q}(t) \cdot \mathbf{q}(t) = [\mathbf{i} \times \mathbf{u}]^T [\mathbf{i} \times \mathbf{u}] \quad (7.б)$$

$$s^2(t) = u^2(t) i^2(t). \quad (7.в)$$

### Синусоидальный режим и 3-комплексы

Мгновенные значения синусоидальных процессов напряжения и тока

$$\mathbf{u}(t) = \sqrt{2} \Re e [U e^{j\omega t}], \quad \mathbf{i}(t) = \sqrt{2} \Re e [I e^{j\omega t}] \quad (8)$$

однозначно определены трехмерными *комплексными* векторами (3-комплексами) напряжения  $\mathbf{U} = (\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)^T$  и тока  $\mathbf{I} = (\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c)^T$  – векторами комплексных *д.в.*:

$$\mathbf{U} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T \mathbf{u}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad \mathbf{I} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (9)$$

где  $T$  – период ( $T\omega = 2\pi$ ).

*Комплексное* СП 3-комплексов  $(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  и определено как произведение матрицы-строки  $\mathbf{X}^T = (\dot{X}_a, \dot{X}_b, \dot{X}_c)$  на *комплексно сопряженную* (КС) матрицу-столбец  $\mathbf{Y}^* = (\dot{Y}_a^*, \dot{Y}_b^*, \dot{Y}_c^*)^T$

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}^* = \dot{X}_a \dot{Y}_a^* + \dot{X}_b \dot{Y}_b^* + \dot{X}_c \dot{Y}_c^*, \quad (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = (\mathbf{Y}, \mathbf{X})^*. \quad (10)$$

3-комплексы  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}$  ортогональны, если их комплексное скалярное произведение равно нулю

$$\mathbf{X} \perp \mathbf{Y} \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{X}^* \mathbf{Y}^* = 0. \quad (11)$$

### Мгновенные мощности синусоидального режима

При синусоидальных процессах ММ (1) можно представить как

$$p(t) = \mathbf{u}(t)^T \mathbf{i}(t) = \Re e \left[ \dot{\mathbf{S}} + \dot{N} e^{j2\omega t} \right] \quad (12)$$

Стандартная комплексная мощность (КМ)

$$\dot{\mathbf{S}} = P + jQ = \dot{U}_a \mathbf{I}_a^* + \dot{U}_b \mathbf{I}_b^* + \dot{U}_c \mathbf{I}_c^* = \mathbf{U}^T \mathbf{I}^* = (\mathbf{U}, \mathbf{I}) \quad (13)$$

равна комплексному СП комплексов напряжения  $\mathbf{U}$  и тока  $\mathbf{I}$  [5].

Реальная часть стандартной КМ равна средней мощности за интервал наблюдения  $[\tau, \tau + T]$

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt, \quad \bar{p} = \Re e \dot{\mathbf{S}} = P. \quad (14)$$

Мнимая часть КМ  $\Im m \dot{\mathbf{S}} = Q$  определяет реактивную мощность синусоидального режима.

Осциллирующая составляющая ММ

$$\tilde{p} = \Re e [\dot{N} e^{j2\omega t}] = N \cos(2\omega t + \arg \dot{N}) \quad (15.a)$$

однозначно определена комплексной амплитудой пульсации активной ММ (комплексной мощностью пульсаций)

$$\dot{N} = \dot{U}_a \dot{\mathbf{I}}_a + \dot{U}_b \dot{\mathbf{I}}_b + \dot{U}_c \dot{\mathbf{I}}_c = \mathbf{I}^T (\mathbf{U}^*)^* = (\mathbf{I}, \mathbf{U}^*), \quad (15.б)$$

которая равна комплексному СП [5] вектора тока и (КС) 3-комплекса напряжения  $\mathbf{U}^* = [U_a^* \ U_b^* \ U_c^*]^T$ .

Из (3) и (15) следует, что синусоидальный режим *уравновешен*, если выполняется одно из эквивалентных утверждений

$$\tilde{p} = \Re e [\dot{N} e^{j2\omega t}] \equiv 0 \Leftrightarrow \dot{N} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{U}^* \perp \mathbf{I}. \quad (16)$$

При симметричном напряжении прямой последовательности, режим уравновешен, если ток не содержит обратную последовательность.

ВП 3-комплексов  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}$  определяется также как ВП для вещественных 3-векторов. Комплексы  $\mathbf{X}$  and  $\mathbf{Y}$  параллельны (коллинеарны  $\mathbf{X} // \mathbf{Y}$ ), если их координаты комплексно пропорциональны или ВП равно нулю

$$\mathbf{X} // \mathbf{Y} \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} \mathbf{X} = \lambda \mathbf{Y} \ (\lambda \neq 0) \Leftrightarrow [\mathbf{X} \times \mathbf{Y}] = 0. \quad (17)$$

Если в синусоидальном режиме активная ММ характеризуется двумя известными комплексными скалярным произведениями: стандартной КМ (13) и мощностью пульсации (15.б), то неактивная ММ

(4) – векторная величина и (можно показать, что) в синусоидальном режиме

$$\mathbf{q} = \mathbf{u} \times \mathbf{i} = \Re[\mathbf{U} \times \mathbf{I}^* + (\mathbf{U} \times \mathbf{I})e^{j2\omega t}] \quad (18)$$

представляется двумя новыми векторными комплексными мощностями: ВП 3-комплексов напряжения и тока и ВП 3-комплекса напряжения и КС 3-комплекса тока

$$\mathbf{D} = \mathbf{U} \times \mathbf{I} \quad , \quad \mathbf{K} = \mathbf{U} \times \mathbf{I}^* \quad . \quad (19)$$

Векторная ММ может быть записана как

$$\mathbf{q} = \underbrace{\Re[\mathbf{K}]}_{\tilde{\mathbf{q}}} + \underbrace{\Re[\mathbf{D}e^{j2\omega t}]}_{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (20)$$

Что дает явное представление для постоянной и переменной составляющих в синусоидальном режиме

$$\bar{\mathbf{q}} = \Re[\mathbf{K}] \quad , \quad \tilde{\mathbf{q}}(t) = \Re[\mathbf{D}e^{j2\omega t}] \quad (21)$$

Из (17) и (21) следует, что синусоидальный режим *сбалансирован* если выполняется одно из эквивалентных утверждений

$$\tilde{\mathbf{q}}(t) = \Re[\mathbf{D}e^{j2\omega t}] \equiv 0 \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{D} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{U} \parallel \mathbf{I} \quad . \quad (22)$$

Поэтому вектор  $\mathbf{D} = \mathbf{U} \times \mathbf{I}$  может быть назван 3-комплексом (вектором) мощности *небаланса* [6]. При несимметричном напряжении и симметричной нагрузке  $\mathbf{U} \parallel \mathbf{I}$  и синусоидальный режим сбалансирован (однако неуравновешен).

### **Уравнения мощности несбалансированного и неуровновешенного синусоидального режимов**

Операции сложения и умножения для вещественных и комплексных чисел обладают одинаковыми свойствами. Поэтому *тождество* векторной алгебры (5) остается справедливым и для комплексных векторов. Следует только вместо вещественного скалярного произведения использовать комплексное СП. Можно показать, что

$$[\mathbf{X} \times \mathbf{Y}]^* \cdot [\mathbf{X}^* \times \mathbf{Y}^*] = \begin{vmatrix} (\mathbf{X}^* \cdot \mathbf{X}^*) & (\mathbf{X}^* \cdot \mathbf{Y}^*) \\ (\mathbf{Y}^* \cdot \mathbf{X}^*) & (\mathbf{Y}^* \cdot \mathbf{Y}^*) \end{vmatrix} \quad (23.a)$$

Откуда имеем

$$|\mathbf{X} \times \mathbf{Y}|^2 = |\mathbf{X}|^2 |\mathbf{Y}|^2 - |\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}|^2 \quad . \quad (23.б)$$

Здесь и дальше использованы стандартные обозначения для скалярных квадратов комплексного СП (10)

$$X^2 = |\mathbf{X}|^2 = \mathbf{X}^* \cdot \mathbf{X}^* \quad , \quad Y^2 = |\mathbf{Y}|^2 = \mathbf{Y}^* \cdot \mathbf{Y}^* \quad , \quad (24)$$

и очевидные свойства операции комплексного сопряжения

$$\mathbf{Y}^* \cdot \mathbf{X}^* = (\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y})^* \quad , \quad |\mathbf{X} \times \mathbf{Y}|^2 = (\mathbf{X} \times \mathbf{Y})^* \cdot (\mathbf{X} \times \mathbf{Y})^* \quad . \quad (25)$$

Полагая  $X = I$ ,  $Y = U$  из (23) получим

$$|I|^2 |U|^2 = \dot{S} S^* + D \cdot D^* . \quad (26)$$

Что дает квадратичное разложение [5,6] полной (кажущейся) мощности по Бухгольцу  $S_B = \#U // I \neq U \cdot I$  на две компоненты

$$S_B^2 = S_G^2 + D_u^2 . \quad (27)$$

Здесь и дальше:  $S_G = |U \cdot I^*| = \sqrt{\dot{S} S^*} = |\dot{S}|$  – геометрическая мощность, равная модулю стандартной КМ;  $D_u = |D| = \sqrt{D \cdot D^*}$  – норма 3-комплекса небаланса.

Так как  $S_G^2 = P^2 + Q^2$ , из (27) имеем уравнение мощности для оценки дополнительных потерь в несбалансированном режиме

$$S_B^2 = P^2 + \underbrace{Q^2 + D_u^2}_{\text{дополнительные потери}} . \quad (28)$$

В синусоидальном режиме дополнительные потери обусловлены не только реактивной мощностью, но и небалансом режима. Коэффициент мощности при этом равен

$$\lambda = \frac{P}{S_B} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D_u^2}} . \quad (29)$$

Полагая  $X = I$ ,  $Y = U^*$  из (23) имеем другое *квадратичное разложение полной мощности для оценки неуровновешенности режима* [6]

$$|I|^2 |U|^2 = \dot{N} N^* + K \cdot K^* , \quad S_B^2 = N^2 + K^2 . \quad (30)$$

3-комплекс  $K = U \times I^*$  можно назвать вектором *непульсирующей* мощности неуровновешенного режима и определить коэффициент пульсации

$$r = \frac{N}{S_B} = \frac{N}{\sqrt{N^2 + K^2}} . \quad (31)$$

Таким образом, уравновешенный и сбалансированный режим – различные энергетические понятия. Сбалансированный режим может быть неуровновешенным и наоборот. Однако введенные мощности разложения (30) связаны с мощностями разложения (28) [6].

### **Вычислительные формулы при симметричном напряжении**

В четырехпроводной схеме (рис. 1) с несимметричной линейной нагрузкой и симметричным напряжением источника генерации 3-комплекс прямой последовательности

$$U = \tilde{U}(1, \alpha^*, \alpha)^* , \quad (\alpha = e^{j2\pi/3}) , \quad (32)$$

определен базовой величиной напряжения на одну фазу  $\tilde{U} = |U|/\sqrt{3}$ .

3-комплекс тока и его скалярный квадрат определяются через проводимости нагрузки

$$\mathbf{I} = \tilde{U}(\dot{Y}_a, \alpha^* \dot{Y}_b, \alpha \dot{Y}_c), \quad |\mathbf{I}|^2 = Y^2 \tilde{U}^2, \quad (33)$$

где  $Y^2 = \left( |\dot{Y}_a|^2 + |\dot{Y}_b|^2 + |\dot{Y}_c|^2 \right)$ .

Тогда для КМ (14) и мощности пульсаций (15.б) получим  $\dot{N} = \mathbf{I}^T \mathbf{U} = (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b \alpha + \dot{Y}_c \alpha^*) \tilde{U}^2$ ,  $S^* = \mathbf{I}^T \mathbf{U}^* = (\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c) \tilde{U}^2$  (34)

Для векторов мощности (19) имеем

$$\mathbf{D} = \mathbf{U} \times \mathbf{I} = \tilde{U}^2 \left[ (\dot{Y}_b - \dot{Y}_c), (\dot{Y}_c - \dot{Y}_a) \alpha, (\dot{Y}_a - \dot{Y}_b) \alpha^* \right]. \quad (35)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{I} \times \mathbf{U}^* = \tilde{U}^2 \left[ \dot{Y}_b \alpha - \dot{Y}_c \alpha^*, \dot{Y}_c \alpha - \dot{Y}_a \alpha^*, \dot{Y}_a \alpha - \dot{Y}_b \alpha^* \right]. \quad (36)$$

Что для их квадратов дает

$$|\mathbf{D}|^2 = \tilde{U}^4 \left[ |\dot{Y}_b - \dot{Y}_c|^2 + |\dot{Y}_c - \dot{Y}_a| + |\dot{Y}_a - \dot{Y}_b|^2 \right] \quad (37)$$

$$|\mathbf{K}|^2 = \tilde{U}^4 \left[ |\dot{Y}_b - \alpha \dot{Y}_c|^2 + |\dot{Y}_c - \alpha \dot{Y}_a| + |\dot{Y}_a - \alpha \dot{Y}_b|^2 \right] \quad (38)$$

### Примеры неуровновешенного и несбалансированного режимов

В рассматриваемых ниже примерах все величины приведены в относительных единицах. Базовые величины на одну фазу: проводимости  $\tilde{Y}$ , напряжение  $\tilde{U}$ , ток  $\tilde{I}$ , мощности  $\tilde{W}$  удовлетворяют соотношениям  $\tilde{W} = \tilde{U} \cdot \tilde{I} = \tilde{Y} \cdot \tilde{U}^2$ .

Нагрузка задана проводимостями фаз (табл. 1) и выбрана так, что реактивная мощность равна нулю ( $Q = 0$ ).

Таблица 1 – Проводимости фаз

| №           | 1                         | 2           | 3            | 4             |
|-------------|---------------------------|-------------|--------------|---------------|
| $\dot{Y}_A$ | 0                         | $\tilde{Y}$ | $2\tilde{Y}$ | $\tilde{Y}$   |
| $\dot{Y}_B$ | $\tilde{Y}e^{-j30^\circ}$ | 0           | $\tilde{Y}$  | $-j\tilde{Y}$ |
| $\dot{Y}_C$ | $\tilde{Y}e^{-j30^\circ}$ | 0           | $\tilde{Y}$  | $j\tilde{Y}$  |

*Пример 1. Уравновешенный, но несбалансированный режим*

Несмотря на то, что нагрузка несимметрична, режим уравновешен (ток обратной последовательности равен нулю). Однако – режим не-

сбалансирован (имеется ток нулевой последовательности).

*Пример 2. Однофазная чисто активная нагрузка.* Цепь ведет себя как однофазная с чисто активной нагрузкой  $p(t) = \tilde{W}[1 + \cos 2\omega t]$ .

*Пример 3. Чисто активная несимметричная нагрузка.* Поток энергии однонаправленный  $p(t) = 3\tilde{W}[1 + 0,5 \cos 2\omega t]$ .

*Пример 4. Неуравновешенный режим с обменом энергии.* Амплитуда переменной составляющей ММ в два раза превосходит активную мощность. Поток энергии двунаправленный

$p(t) = \tilde{W}\left[1 + \left(1 + \sqrt{3}\right)\cos 2\omega t\right]$ . Результаты расчета сведены в табл.2.

Таблица 2 – Результаты расчета

| №                      | 1                   | 2                   | 3                        | 4                                 |
|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| $ I $                  | $\sqrt{2}\tilde{I}$ | $\tilde{I}$         | $(3/\sqrt{2})\tilde{I}$  | $\sqrt{3}\tilde{I}$               |
| $P = \Re e \dot{S}$    | $\sqrt{3}\tilde{W}$ | $\tilde{W}$         | $3\tilde{W}$             | $\tilde{W}$                       |
| $D_u =  U \times I $   | $\sqrt{3}\tilde{W}$ | $\sqrt{2}\tilde{W}$ | $(3/\sqrt{2})\tilde{W}$  | $2\sqrt{2}\tilde{W}$              |
| $S_B =  I  U $         | $\sqrt{6}\tilde{W}$ | $\sqrt{3}\tilde{W}$ | $3\sqrt{3/2}\tilde{W}$   | $3\tilde{W}$                      |
| $N =  I^* U $          | 0                   | $\tilde{W}$         | $(3/2)\tilde{W}$         | $(1 + \sqrt{3})\tilde{W}$         |
| $ K  =  I \times U^* $ | $\sqrt{6}\tilde{W}$ | $\sqrt{2}\tilde{W}$ | $(3\sqrt{5}/2)\tilde{W}$ | $(\sqrt{5} - 2\sqrt{3})\tilde{W}$ |
| $\lambda = P/S_B$      | $1/\sqrt{2}$        | $1/\sqrt{3}$        | $\sqrt{2/3}$             | $1/3$                             |
| $\lambda_v = N/S_B$    | 0                   | $1/\sqrt{3}$        | $1/\sqrt{6}$             | $1/3 + 1/\sqrt{3}$                |

Можно проверить, что мощности в представленных примерах удовлетворяют полученным выше уравнениям.

**Выводы.** Предложенный метод позволяет оценивать режимы, создаваемые подключаемыми нагрузками, как однофазными, так и трехфазными. Проведенный анализ позволяет разрабатывать устройства улучшающие режимы энергопотребления [2].

**Список литературы:** 1. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин. – М.-Л.: "Госэнергоиздат", 1955. – 216 с. 2. Sirotin. Iu. A. Fryze's compensator and Fortescue transformation. / Iu.A. Sirotin // "Przegląd Elektrotechniczny" (Electrical Review). – 2011. –Vol. 1. – Pp. 101-106. – Режим доступа: [http://pe.org.pl/abstract\\_pl.php?nid=4568](http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=4568). 3. F.Z. Peng, J.S. Lai. Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1996. – Vol. 45, No.1, Feb. – Pp. 293-297. 4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука,



1973. – 832 с. **5.** *Сиротин Ю.А.* Мощность разбаланса и пульсации мгновенной мощности при симметричном напряжении / *Ю.А. Сиротин* // Электрика. – 2009. – № 11. – С. 15-21, <http://www.nait.ru/journals>. **6.** *Сиротин Ю.А.* Ток, мощность и уравнение пульсаций в трехфазной системе / *Ю.А. Сиротин* // Вісник НТУ "ХПІ", Сб. науч. трудов. Темат. вып.: Энергетика: надежность и энергоэффективность. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – №. 23, – С. 146-159. [www.nbuu.gov.ua/portal/natural/vcpi/Ente/2012\\_23/19.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/vcpi/Ente/2012_23/19.pdf)



**Ю.А. Сиротин**, к.т.н., доцент. В 1973 г. окончил механико-математический факультет Харьковского государственного университета им. М. Горького. Работал в различных НИИ как разработчик алгоритмов и математических моделей электрических устройств и систем. В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию по радиолокации и радионавигации в Военной радиотехнической академии им. Говорова (Харьков). С 1994 г. преподавал высшую математику в Харьковском военном университете. С 2004 года работает на кафедре автоматизации энергосистем НТУ "ХПИ". Область научных интересов в настоящее время: теория мощности, компенсация, качество поставки и потребления электроэнергии; математическое моделирование в электроэнергетике.

*Надійшла до редколегії 24.09.2012*

УДК 621.31

**Неуравновешенный и несбалансированный режимы трехфазной четырёхпроводной цепи / Сиротин Ю.А.** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 120-128. Бібліогр.: 6 назв.

Для несинусоїдальних процесів поряд з невірноваженим режимом введено незбалансований режим. Показано, як ці режими визначаються при синусоїдальних процесах через комплексні потужності. Отримані два дуальних рівняння комплексних потужностей для розглянутих режимів.

**Ключові слова:** миттєві і комплексні ступені, пульс і незбалансований режим, потужність рівнянь, трифазні чотирипровідні ланцюги.

Along with the pulse mode for non-sinusoidal processes, an unbalanced mode is introduced. How these modes are defined in terms of the complex powers at the sinusoidal processes is shown. Two dual complex power equations for the considered modes are obtained.

**Keywords:** instantaneous and complex powers, pulse and unbalanced mode, power equations, three-phase four-wire circuits.