

ВИЗНАЧЕННЯ ПУЛЬСУЮЧОЇ ПОТУЖНОСТІ В НЕСИМЕТРИЧНИХ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

М.Й. Бурбело^{1*}, докт.техн.наук, А.В. Гадай^{2**}, канд.техн.наук, О.В. Степура³

¹ – Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна.

E-mail: burbelomj@gmail.com

² – Луцький національний технічний університет,
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна.

E-mail: haday@meta.ua

³ – ТОВ ІТЦ "Енергооблік",
вул. Пирогова, 151А, Вінниця, 21008, Україна.

E-mail: Stepua74@gmail.com

Проаналізовано можливість визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах трифазних мереж. Показано, що пульсуюча потужність містить складники, зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, які характеризуються відповідно умовною потужністю зворотної послідовності та потужністю спотворення. Отримано вирази потужності спотворення в інтегральній та комплексній формах запису. Бібл. 20, рис. 3.

Ключові слова: електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, визначення пульсуючої потужності.

Постановка задачі. Наявність на промислових підприємствах потужних навантажень з нелінійними та несиметричними параметрами спричинює певні проблеми з електромагнітною сумісністю споживачів, обліком електроенергії, компенсацією реактивної потужності [1]. Визначення пульсуючої потужності є важливим моментом, від успішного вирішення якого залежить вирішення вказаних проблем.

Активну та реактивну потужності визначають шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt; \quad Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt. \quad (1)$$

Миттєві активна та реактивна потужності є скалярними добутками векторів трифазних миттєвих напруг і струмів

$$p = (\mathbf{U} \cdot \mathbf{I}) = (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C), \quad (2)$$

$$q = (\mathbf{U}' \cdot \mathbf{I}) = (u'_A i_A + u'_B i_B + u'_C i_C), \quad (3)$$

де $\mathbf{U}, \mathbf{U}', \mathbf{I}$ – вектори напруг і струмів у фазних координатах $[u_A, u_B, u_C]^T$, $[u'_A, u'_B, u'_C]^T$, $[i_A, i_B, i_C]^T$, штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув миттєвих величин на -90 ел. градусів. За умов несинусоїдності фазовий зсув усіх гармонік напруги забезпечується із застосуванням перетворення Гільберта.

У разі симетричного джерела живлення, мережі та навантаження трифазної системи миттєві потужності не змінюються у часі. За несиметричного джерела живлення, мережі або навантаження виникають коливання миттєвих потужностей з частотою вдвічі вищою від частоти напруги мережі, які визначають за допомогою пульсуючої потужності.

Пульсуюча потужність трифазного несиметричного навантаження є змінною складовою миттєвої активної та реактивної потужностей [3], складники якої можна визначити як різницю (зі знаком мінус) відповідно миттєвої активної потужності $p(t)$ і активної потужності P та миттєвої реактивної потужності $q(t)$ і реактивної потужності Q трифазного навантаження

© Бурбело М.Й., Гадай А.В., Степура О.В., 2019

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-4510-2911> ; ** <https://orcid.org/0000-0002-4195-7218>

$$N(t) = -(p(t) - P); \quad N'(t) = -(q(t) - Q). \quad (4)$$

У несиметричних синусоїдних режимах складники пульсуючої потужності $N(t)$ та $N'(t)$ є синусоїдними функціями з однаковими амплітудами і зсувом фази на 90 ел. градусів.

Пульсуючу потужність застосовують для керування статичними синхронними компенсаторами і активними фільтрами в мережах живлення несиметричних нелінійних споживачів [4–7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом несиметричним несинусоїдним режимам електричних мереж приділяється багато уваги [8, 9] з використанням p - q теорії миттєвої потужності. В роботах [10–12] вказано, що використання p - q теорії миттєвої потужності призводить до неправильного визначення складових потужності за несиметрії та несинусоїдності живлячої напруги, а також робить неможливою компенсацію окремих гармонік струму. У випадку наявності вищих гармонік у живлячій мережі у [13] запропоновано пристрій компенсації, керування яким побудоване на поліпшеній p - q теорії, а у [14] наведено метод корекції алгоритму керування за несиметрії напруг живлячої мережі. У [15] миттєві пульсуючі активну та реактивну потужності подано сумою потужностей, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю. Однак обґрунтування такого підходу відсутнє. Відсутні також математичні вирази, які можна було б використати для визначення цих складників. У [16, 17] робиться спроба отримати такі вирази, проте належного обґрунтування немає.

Мета роботи – визначити математичні вирази для визначення складників пульсуючої потужності, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю напруг і струмів, за несиметричних несинусоїдних режимів.

Основний матеріал. Миттєві пульсуючі активну та реактивну потужності доцільно подати сумою потужностей, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, у такому вигляді [16, 17]:

$$n_p = p - P = (p_2 - P_2) + s_p; \quad n_q = q - Q = (q_2 - Q_2) + s_q, \quad (5)$$

де p_2, q_2 – миттєві умовні активна та реактивна потужності зворотної послідовності; P_2, Q_2 – їхні середні значення; s_p, s_q – миттєві активна та реактивна потужності спотворення, зумовлені несинусоїдністю напруг і струмів.

Різниця миттєвих умовних активної та реактивної потужностей зворотної послідовності та їхніх середніх значень ($p_2 - P_2, q_2 - Q_2$) характеризують пульсуючу потужність за відсутності несинусоїдності, тобто за несиметричного синусоїдного режиму. При цьому пульсації активної p та реактивної q потужностей у трифазних мережах з ізольованою нейтраллю однозначно характеризуються комплексними умовними потужностями зворотної послідовності $\underline{S}_2, \underline{S}_{2q}$, які визначаються із виразів [18]

$$\underline{S}_2 = 3 \left(\dot{U}_1^* I_2 + \dot{U}_2^* I_1 \right); \quad \underline{S}_{2q} = 3 \left(\dot{U}_1^* I_2 - \dot{U}_2^* I_1 \right); \quad \underline{S}_2 = \dot{U}_\alpha^* I_\alpha - \dot{U}_\beta^* I_\beta; \quad \underline{S}_{2q} = j(\dot{U}_\alpha^* I_\beta + \dot{U}_\beta^* I_\alpha), \quad (6, 7)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, I_1, I_2$ – комплексні напруги та спряжені струми відповідно прямої та зворотної послідовностей; $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta, I_\alpha, I_\beta$ – комплексні напруги та спряжені струми в системі $\alpha\beta$ -координат.

Це дає підставу визначати складники потужності, що зумовлені несиметрією напруг і струмів, з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності [18, 19]

$$p_2 = u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta, \quad q_2 = u_\alpha' i_\alpha + u_\beta i_\beta', \quad (8)$$

де $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$ – миттєві напруги та струми в системі $\alpha\beta$ -координат; штрихом позначено фазовий зсув миттєвих величин на -90 ел. градусів.

Для оцінювання загального рівня пульсацій активної та реактивної потужностей $n_p = p - P; n_q = q - Q$ пропонується використати середньоквадратичні значення потужностей пульсацій на періоді T напруги живлення

$$N_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_p^2(t) dt}; \quad N_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_q^2(t) dt}. \quad (9)$$

Для оцінювання рівня пульсацій, які зумовлені несиметрією навантажень, доцільно використати середньоквадратичні значення умовних потужностей зворотної послідовності на періоді T на-

$$\text{пруги живлення} \quad N_{2p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_{2p}^2(t) dt}; \quad N_{2q} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_{2q}^2(t) dt}, \quad (10)$$

де $n_{2p}(t) = p_2(t) - P_2$; $n_{2q}(t) = q_2(t) - Q_2$ – складники пульсуючої потужності, зумовлені несиметрією навантажень.

Рівень потужності гармонічних спотворень можна визначити шляхом інтегрування квадратів миттєвих потужностей спотворень на періоді T напруги живлення

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_p^2(t) dt}; \quad S_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_q^2(t) dt}. \quad (11)$$

Для визначення комплексних значень окремих складників пульсацій розглянемо більш детально процес формування миттєвої потужності за несинусоїдності напруг і струмів. Як відомо [2], для несинусоїдного режиму однофазного електричного кола миттєва активна потужність визначається з виразу

$$p = \text{Re} \left(\mathbf{1}^T \cdot \left(\underline{S\bar{\omega}}^{|k-n|} + \underline{N\bar{\omega}}^{k+n} \right) \cdot \mathbf{1} \right), \quad (12)$$

де $\mathbf{1}$ – одиничний вектор-стовпець; $\mathbf{1}^T$ – транспонований одиничний вектор; $\underline{S\bar{\omega}}^{|k-n|}$, $\underline{N\bar{\omega}}^{k+n}$ – матриці потужностей пульсацій вигляду

$$\underline{S\bar{\omega}}^{|k-n|} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{11} & \underline{S}_{12}^* \bar{\omega}^1 & \underline{S}_{13}^* \bar{\omega}^2 & \dots \\ \underline{S}_{21} \bar{\omega}^1 & \underline{S}_{22} & \underline{S}_{23}^* \bar{\omega}^1 & \dots \\ \underline{S}_{31} \bar{\omega}^2 & \underline{S}_{32} \bar{\omega}^1 & \underline{S}_{33} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}; \quad \underline{N\bar{\omega}}^{k+n} = \begin{bmatrix} \underline{N}_{11} \bar{\omega}^2 & \underline{N}_{12} \bar{\omega}^3 & \underline{N}_{13} \bar{\omega}^4 & \dots \\ \underline{N}_{21} \bar{\omega}^3 & \underline{N}_{22} \bar{\omega}^4 & \underline{N}_{23} \bar{\omega}^5 & \dots \\ \underline{N}_{31} \bar{\omega}^4 & \underline{N}_{32} \bar{\omega}^5 & \underline{N}_{33} \bar{\omega}^6 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (13)$$

тут $\underline{S}_{kn} = \dot{U}_k \dot{I}_n^* = U_k e^{j\psi_{uk}} \cdot I_n e^{-j\psi_{in}}$; $\underline{S}_{kn}^* = \dot{U}_k^* \dot{I}_n = U_k e^{-j\psi_{uk}} \cdot I_n e^{j\psi_{in}}$; $\underline{N}_{kn} = \dot{U}_k \dot{I}_n = U_k e^{j\psi_{uk}} \cdot I_n e^{j\psi_{in}}$ – комплексні потужності, що характеризують пульсації; $\bar{\omega}^{|k-n|} = e^{j|k-n|\omega t}$; $\bar{\omega}^{k+n} = e^{j(k+n)\omega t}$ – комплексні оператори обертання; k, n – номери гармонічних складників напруги та струму відповідно.

У трифазній мережі за наявності канонічних гармонік, з яких п'ята, одинадцята і т.д. гармоніки утворюють системи зворотної послідовності, а сьома, тринадцята і т.д. – системи прямої послідовності. У цьому випадку миттєві напругу і струм трифазної системи можна записати у такому вигляді:

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{2} (U_1 \sin(\omega t + \psi_{u1}) + U_5 \sin(-5\omega t + \psi_{u5}) + U_7 \sin(7\omega t + \psi_{u7})); \\ i &= \sqrt{2} (I_1 \sin(\omega t + \psi_{i1}) + I_5 \sin(-5\omega t + \psi_{i5}) + I_7 \sin(7\omega t + \psi_{i7})). \end{aligned} \quad (14)$$

Миттєва потужність у розгорнутому вигляді запису

$$\begin{aligned} p &= U_1 I_1 \cos(\psi_{u1} - \psi_{i1}) - U_1 I_1 \cos(2\omega t + \psi_{u1} + \psi_{i1}) + U_1 I_5 \cos(6\omega t + \psi_{u1} - \psi_{i5}) - U_1 I_5 \cos(4\omega t - \psi_{u1} - \psi_{i5}) + \\ &+ U_1 I_7 \cos(6\omega t - \psi_{u1} + \psi_{i7}) - U_1 I_7 \cos(8\omega t + \psi_{u1} + \psi_{i7}) + U_5 I_1 \cos(6\omega t - \psi_{u5} + \psi_{i1}) - U_5 I_1 \cos(4\omega t - \psi_{u5} - \psi_{i1}) + \\ &+ U_5 I_5 \cos(\psi_{u5} - \psi_{i5}) - U_5 I_5 \cos(10\omega t - \psi_{u5} - \psi_{i5}) + U_5 I_7 \cos(12\omega t - \psi_{u5} + \psi_{i7}) - U_5 I_7 \cos(2\omega t + \psi_{u5} + \psi_{i7}) + \\ &+ U_7 I_1 \cos(6\omega t + \psi_{u7} - \psi_{i1}) - U_7 I_1 \cos(8\omega t + \psi_{u7} + \psi_{i1}) + U_7 I_5 \cos(12\omega t + \psi_{u7} - \psi_{i5}) - U_7 I_5 \cos(2\omega t + \psi_{u7} + \psi_{i5}) + \\ &+ U_7 I_7 \cos(\psi_{u7} - \psi_{i7}) - U_7 I_7 \cos(14\omega t + \psi_{u7} + \psi_{i7}). \end{aligned} \quad (15)$$

У такому випадку матриці потужностей пульсацій будуть такими

$$\underline{S\bar{\omega}}^{|k-n|} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{11} & \underline{S}_{15} \bar{\omega}^6 & \underline{S}_{17}^* \bar{\omega}^6 \\ \underline{S}_{51}^* \bar{\omega}^6 & \underline{S}_{55} & \underline{S}_{57}^* \bar{\omega}^{12} \\ \underline{S}_{71} \bar{\omega}^6 & \underline{S}_{75} \bar{\omega}^{12} & \underline{S}_{77} \end{bmatrix}; \quad \underline{N\bar{\omega}}^{k+n} = \begin{bmatrix} \underline{N}_{11} \bar{\omega}^2 & \underline{N}_{15}^* \bar{\omega}^4 & \underline{N}_{17} \bar{\omega}^8 \\ \underline{N}_{51}^* \bar{\omega}^4 & \underline{N}_{55}^* \bar{\omega}^{10} & \underline{N}_{57} \bar{\omega}^2 \\ \underline{N}_{71} \bar{\omega}^8 & \underline{N}_{75} \bar{\omega}^2 & \underline{N}_{77} \bar{\omega}^{14} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Перша з цих матриць характеризує формування потужності спотворення переважно шостої гармоніки, а друга – потужності несиметрії – переважно другої гармоніки. Вміст четвертої, восьмої, гармонік порівняно менший.

Отже, складники комплексної потужності спотворення можна визначити шляхом інтегрування виділеної шостої гармоніки миттєвих потужностей спотворення на періоді T напруги живлення

$$\operatorname{Re} \underline{S}_{p,6} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{T}{T_0} \int s_p \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_{p,6} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{T}{T_0} \int s_p \cos 6\omega t dt; \quad (17)$$

$$\operatorname{Re} \underline{S}_{q,6} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{T}{T_0} \int s_q \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_{q,6} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{T}{T_0} \int s_q \cos 6\omega t dt. \quad (18)$$

Значення потужності спотворення можна також визначити за векторним добутком векторів комплексних напруг і комплексних спряжених струмів гармонічних складових [20]

$$\bar{S}_{ij} = \bar{U} \times \bar{I}^*; \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{15} \\ \dot{U}_{17} \end{bmatrix}; \quad \bar{I}^* = \begin{bmatrix} * \\ I_{11} \\ * \\ I_{15} \\ * \\ I_{17} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Комплексні значення потужностей спотворення визначаються з таких виразів:

$$\underline{S}_{p,6} \approx \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Im} \left[\left(\dot{U}_{11} I_{15}^* - \dot{U}_{15} I_{11}^* \right) + \left(\dot{U}_{11} I_{17}^* - \dot{U}_{17} I_{11}^* \right) \right] + j \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Re} \left[- \left(\dot{U}_{11} I_{15}^* + \dot{U}_{15} I_{11}^* \right) + \left(\dot{U}_{11} I_{17}^* + \dot{U}_{17} I_{11}^* \right) \right]; \quad (20)$$

$$\underline{S}_{q,6} \approx - \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Re} \left[\left(\dot{U}_{11} I_{15}^* - \dot{U}_{15} I_{11}^* \right) + \left(\dot{U}_{11} I_{17}^* - \dot{U}_{17} I_{11}^* \right) \right] + j \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Im} \left[- \left(\dot{U}_{11} I_{15}^* + \dot{U}_{15} I_{11}^* \right) + \left(\dot{U}_{11} I_{17}^* + \dot{U}_{17} I_{11}^* \right) \right]. \quad (21)$$

Тут перший індекс комплексних напруг і спряжених комплексних струмів вказує на використання комплексів напруг і струмів прямої послідовності, а другий – на номер гармоніки.

За несиметричних несинусоїдних режимів комплексні значення потужностей спотворення можна визначити за векторним добутком векторів комплексних напруг і комплексних спряжених струмів прямої та зворотної послідовностей гармонічних складових

$$\bar{S}_{ij} = \bar{U} \times \bar{I}^*; \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{15} \\ \dot{U}_{17} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{U}_{25} \\ \dot{U}_{27} \end{bmatrix}; \quad \bar{I}^* = \begin{bmatrix} * \\ I_{11} \\ * \\ I_{15} \\ * \\ I_{17} \\ * \\ I_{21} \\ * \\ I_{25} \\ * \\ I_{27} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

де перший індекс комплексних напруг і спряжених комплексних струмів вказує на використання комплексів напруг і струмів прямої або зворотної послідовності, а другий – на номер гармоніки.

У разі врахування комбінаційних складників, що зумовлені основною гармонікою прямої послідовності та п'ятою і сьомою гармоніками зворотної послідовності, а також основною гармонікою зворотної послідовності та п'ятою і сьомою гармоніками прямої послідовності, вирази набудуть вигляду

$$\underline{S}_{p,6} \approx \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Im} \left[\left(\dot{U}_{11} I_{15}^* - \dot{U}_{15} I_{11}^* \right) + \left(\dot{U}_{11} I_{17}^* - \dot{U}_{17} I_{11}^* \right) - \left(\dot{U}_{11} I_{25}^* - \dot{U}_{25} I_{11}^* \right) - \left(\dot{U}_{11} I_{27}^* - \dot{U}_{27} I_{11}^* \right) - \right. \\ \left. - \left(\dot{U}_{21} I_{15}^* - \dot{U}_{15} I_{21}^* \right) - \left(\dot{U}_{21} I_{17}^* - \dot{U}_{17} I_{21}^* \right) \right] + \\ + j \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Re} \left[- \left(\dot{U}_{11} I_{15}^* + \dot{U}_{15} I_{11}^* \right) + \left(\dot{U}_{11} I_{17}^* + \dot{U}_{17} I_{11}^* \right) + \left(\dot{U}_{11} I_{25}^* + \dot{U}_{25} I_{11}^* \right) - \left(\dot{U}_{11} I_{27}^* + \dot{U}_{27} I_{11}^* \right) + \right. \\ \left. + \left(\dot{U}_{21} I_{15}^* + \dot{U}_{15} I_{21}^* \right) - \left(\dot{U}_{21} I_{17}^* + \dot{U}_{17} I_{21}^* \right) \right]; \quad (23)$$

$$\underline{S}_{q,6} \approx -\frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Re} \left[\begin{aligned} & \left(\dot{U}_{11}^* I_{15} - \dot{U}_{15}^* I_{11} \right) + \left(\dot{U}_{11}^* I_{17} - \dot{U}_{17}^* I_{11} \right) - \left(\dot{U}_{11}^* I_{25} - \dot{U}_{25}^* I_{11} \right) - \left(\dot{U}_{11}^* I_{27} - \dot{U}_{27}^* I_{11} \right) - \\ & - \left(\dot{U}_{21}^* I_{15} - \dot{U}_{15}^* I_{21} \right) - \left(\dot{U}_{21}^* I_{17} - \dot{U}_{17}^* I_{21} \right) \end{aligned} \right] + \\ + j \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Im} \left[\begin{aligned} & - \left(\dot{U}_{11}^* I_{15} + \dot{U}_{15}^* I_{11} \right) + \left(\dot{U}_{11}^* I_{17} + \dot{U}_{17}^* I_{11} \right) + \left(\dot{U}_{11}^* I_{25} + \dot{U}_{25}^* I_{11} \right) - \left(\dot{U}_{11}^* I_{27} + \dot{U}_{27}^* I_{11} \right) + \\ & + \left(\dot{U}_{21}^* I_{15} + \dot{U}_{15}^* I_{21} \right) - \left(\dot{U}_{21}^* I_{17} + \dot{U}_{17}^* I_{21} \right) \end{aligned} \right]. \quad (24)$$

Розглянемо несиметричний несинусоїдний режим, за якого струм навантаження, крім першої гармоніки, містить п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 5 та 4 % від амплітуди основної гармоніки, а амплітуди п'ятої та сьомої гармонік напруги становлять 0,5 % від амплітуди основної гармоніки, і одночасно напруга фази *C* менша на 10 % від значення напруг інших фаз.

Потужність навантаження: $S_1 = 1405 e^{j30^\circ} = 1216,8 + j702,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$.

Миттєві значення струмів *i* та напруг *u* вказаного режиму показано на рис. 1. На рис. 2 зображено залежності миттєвих величин *p*, *q*, які характеризуються змінними коливними процесами протягом півперіоду, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю.

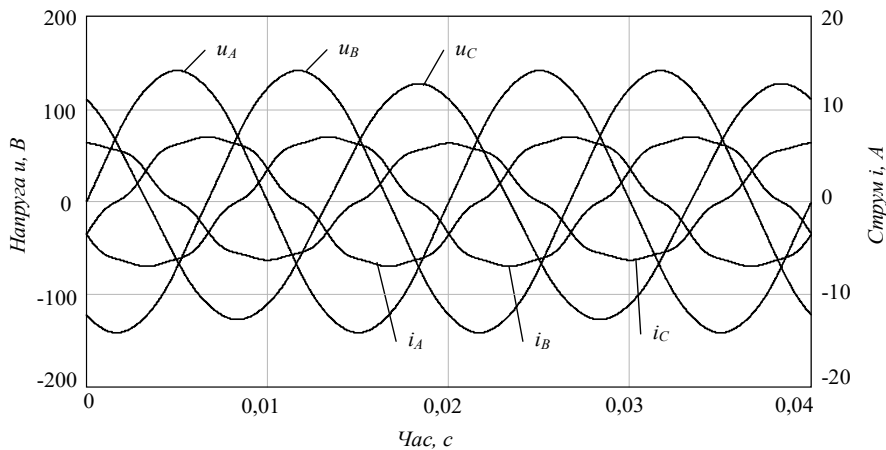


Рис. 1

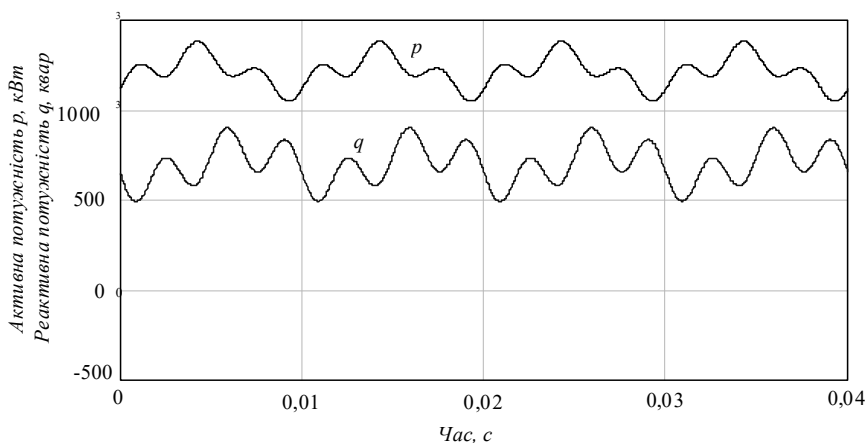


Рис. 2

Розглянемо залежності p_2 , q_2 , коливання яких спричинені лише несиметрією, і залежності $p - p_2$, $q - q_2$, коливання яких зумовлені лише несинусоїдністю (рис. 3). Коливання складників потужностей, спричинені несиметрією, у даному випадку містять переважно гармоніку потужності з частотою у два рази більшою від частоти напруги мережі. Коливання складників потужностей, зумовлені несинусоїдністю, у даному випадку містять переважно гармоніку потужності з частотою в шість разів більшою від частоти напруги мережі, що пояснюється взаємовпливом основної з вищими (п'ятою та сьомою) гармоніками.

Для наведеного прикладу розраховані за формулами (9) значення потужностей пульсацій: $N_p = 84,1 \text{ кВт}$; $N_q = 109,4 \text{ кВАр}$; за формулами (10) значення потужностей зворотної послідовності: $N_{2p} = 68,5 \text{ кВт}$; $N_{2q} = 68,5$

кВАр; за формулами (11) значення потужностей гармонічних спотворень будуть: $S_p = 48,7 \text{ кВт}$;

$S_q = 83,2 \text{ кВАр}$. Умова їхньої ортогональності $N_p \approx \sqrt{N_{2p}^2 + S_p^2}$; $N_q \approx \sqrt{N_{2q}^2 + S_q^2}$ виконується.

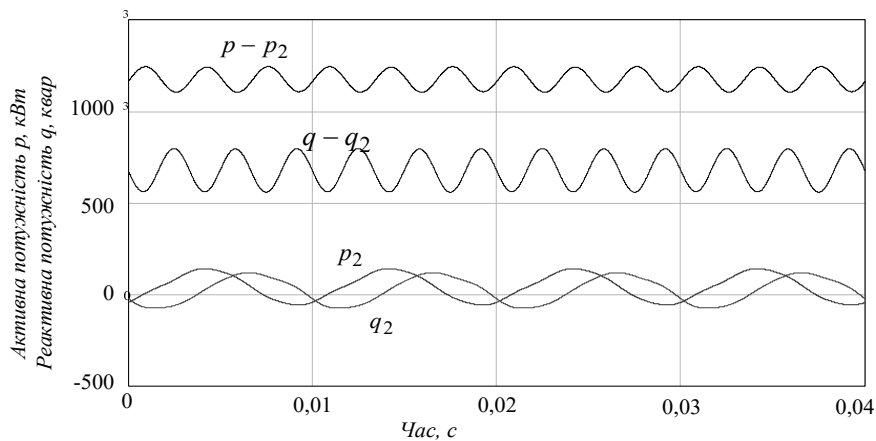


Рис. 3

характеризувати однією гармонічною складовою пульсацій активної та реактивної миттєвих потужностей, визначеними на шостій гармоніці напруги живлення.

Розраховані за формулами (20), (21) комплексні значення потужності спотворення відповідно становлять: $\underline{S}_{p,6} = 49,6 - j8,5$ кВ·А, $\underline{S}_{q,6} = -85,8 - j5,0$ кВ·А. Відмінність між визначеними за миттєвими значеннями та розрахованими за комплексними значеннями потужності спотворення пояснюється неврахуванням усіх складників цієї потужності, зокрема, нехтуванням напругами та струмами зворотної послідовності.

Комплексні значення потужності спотворення за формулами (23), (24) відповідно $\underline{S}_{p,6} = 47,8 - j8,3 = 48,6e^{-j9,8^\circ}$ кВ·А, $\underline{S}_{q,6} = -82,9 - j4,8 = 83,0e^{-j176,7^\circ}$ кВ·А. Отримані результати практично збігаються з результатами, отриманими за формулами (11) та (17), (18).

Потужності пульсацій на четвертій і восьмій гармоніках відповідно: $\underline{S}_{p,4} = 1,5 + j2,2$ кВ·А, $\underline{S}_{q,4} = -2,6 + j1,3$ кВ·А та $\underline{S}_{p,8} = 1,2 - j2,4$ кВ·А, $\underline{S}_{q,8} = -2,0 - j1,4$ кВ·А. Для решти гармонічних складників амплітудні значення на порядок менші. Дослідження в електричних мережах систем електропостачання з подібними навантаженнями показали, що процентний вміст гармонік практично не змінюється.

Розділення пульсуючої потужності на дві складові дає можливість визначити причини погіршення показників якості електроенергії під час роботи систем електропостачання з несиметричним несинусоїдним навантаженням.

Висновки. У несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж пульсуюча потужність містить два складники, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю напруг і струмів. Складники, зумовлені несиметрією, представлено миттєвими умовними потужностями зворотної послідовності. Миттєві потужності, зумовлені несинусоїдністю, визначено як різницю пульсуючої потужності та миттєвої умовної потужності зворотної послідовності. Отримано вирази для визначення комплексних значень потужності спотворення в інтегральній формі запису, які рекомендовано використовувати в процесі вимірювання. У відповідності до цих виразів комплексні значення потужності спотворення визначають шляхом інтегрування виділеної шостої гармоніки (за наявності першої, п'ятої та сьомої гармонік напруги та струму) миттєвих активної та реактивної складових потужності спотворення на періоді T напруги живлення. Отримано вирази для визначення комплексних значень потужності спотворення як векторного добутку векторів комплексних напруг і струмів окремих послідовностей з урахуванням комбінаційних складників, що зумовлені першою, п'ятою та сьомою гармоніками прямої та зворотної послідовностей. Комп'ютерним моделюванням підтверджено правильність цих виразів.

1. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев: Наукова думка, 1985. 268 с.

2. Крөгериш А.Ф., Рашевиц К.К., Трейманис Э.П., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. Рига: Физико-энергетический институт Латвийской АН, 1993. 294 с.

3. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. М.: Энергия, 1975. 128 с.

Комплексні значення потужності спотворення, визначені за миттєвими значеннями на частоті, що відповідає шостій гармоніці напруги за формулами (17), (18), будуть: $\underline{S}_{p,6} =$

$$= 48,0 - j8,3 = 48,7e^{-j9,8^\circ} \text{ кВ}\cdot\text{А},$$

$$\underline{S}_{q,6} = -81,1 - j4,8 = 83,3e^{-j176,7^\circ} \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Отримані значення модулів практично збігаються з результатами за формулами (11). Таким чином, у даному випадку потужності спотворення можна

4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press, Wiley-Interscience, 2007. 379 p.
5. Czarnecki L.S. Constraints of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory. *IET Power Electronics*. 2014. Vol.7. No 9. Pp. 2201–2208.
6. Watanabe E.H., Stephan R.M., Aredes M. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. *IEEE Trans. Power Delivery*. 1993. Vol. 8. No 2. Pp. 697–703.
7. Watanabe E.H., Aredes M., Akagi H. The p-q theory for active filter control: some problems and solutions. *Revista Controle & Automacao*. 2004. Vol. 15. No 1. Pp. 78–84.
8. Nabae A., Tanaka T. A new definition of instantaneous active – reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1996. Vol. 11. No 3. Pp. 1238-1244.
9. Czarnecki L.S. Comments on active power flow and energy accounts in electrical systems with nonsinusoidal waveforms and asymmetry. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 1996. Vol. 11. No 3. Pp. 1244-1250.
10. Czarnecki L.S. On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory. *IEEE Trans. On Power Electronics*. 2004. Vol. 19. No 3. Pp. 828–836.
11. Czarnecki L.S. Effects of supply voltage asymmetry on IRP p-q theory based switching compensator control. *IET Power Electronics*. 2010. Vol. 3. No 1. Pp. 11–17.
12. Tolbert L.M., Halbetler T.G. Comparison of time based non-active power definitions for active filtering. *Power Electronics Congress*. Acapulco, Mexico. 2000. Vol. 1. Pp. 73–79.
13. Kale M., Ozdemir E. Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage. *Electric Power Systems Research*. 2005. Res 77. Pp. 363-370.
14. Колб А.А. Системы группового питания приводов с ёмкостными накопителями и параллельными активными фильтрами. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2011. Вип. 03(79). С. 404-407.
15. Andrzej Firlit. Power Theory with Non-sinusoidal Waveforms. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. . Pp. 27-51.
16. Бурбело М.Й., Гадай А.В. Визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2016. № 24-25. С. 61-67.
17. Бурбело М.Й., Гадай А.В., Мельничук С.М., Лобода Ю.В. Визначення потужностей навантажень трифазних електричних мереж в несинусоїдних та несиметричних режимах. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 1. С. 51-56.
18. Бурбело М.Й., Мельничук С.М., Никитенко М.В. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 2. С. 54–56.
19. Бурбело М.Й., Мельничук С.М. Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 71–75.
20. Пухов Г.Е. Теория мощности системы периодических многофазных токов. *Электричество*. 1953. № 2. С. 56–61.

УДК 621.316.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

М.Й. Бурбело¹, докт.техн.наук, А.В. Гадай², канд.техн.наук, А.В. Степура¹

¹ – Винницкий национальный технический университет,

Винница, Хмельницкое шоссе, 95, 21021, Украина.

E-mail: burbelomj@gmail.com

² – Луцкий национальный технический университет,

ул. Львовская, 75, Луцк, 43018, Украина.

E-mail: haday@meta.ua

³ – ООО ИТЦ "Энергоучет",

ул. Пирогова, 151А, Винница, 21008, Украина.

E-mail: Stepua74@gmail.com

Проанализирована возможность определения пульсирующей мощности в несимметричных несинусоидальных режимах трехфазных сетей. Показано, что пульсирующая мощность содержит составляющие, обусловленные несимметрией и несинусоидальностью, характеризующиеся соответственно условной мощностью обратной последовательности и мощностью искажения. Получены выражения мощности искажения в интегральной и комплексной формах записи. Библи. 20, рис. 3.

Ключевые слова: электрические сети, несимметричные несинусоидальные режимы, определение пульсирующей мощности.

DETERMINATION OF THE OSCILLATING POWER IN ASYMMETRICAL NON-SINUSOIDAL MODES OF ELECTRIC NETWORKS

M.J. Burbelo¹, A.V. Hadai², O.V. Stepura³

¹ – Vinnytsia National Technical University,

95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, 21021, Ukraine.

E-mail: burbelomj@gmail.com

² – Lutsk National Technical University, str. Lvivska, 75, Lutsk, 43018, Ukraine.

E-mail: haday@meta.ua

³ – ITC "Energy Accounting" Ltd., str. Pirogova, 151 A, Vinnytsia, 21008, Ukraine.

E-mail: Stepua74@gmail.com

The paper considers electro-technological installation electricity network. Voltage source contains the basic, fifth and seventh harmonic components of voltage with simultaneous unsymmetry of one phase, and loading is the source of current with the indicated harmonic components. The components of instantaneous power from unsymmetry are determined as instantaneous conditional powers of reverse sequence. These powers are of non-sinusoidal character that testifies to mutual impact of the all harmonic components from different sequences. Pulsating power is written in through the sum of powers predetermined by unsymmetry and non-sinusoidal character. Component powers of reverse sequence and power of harmonic distortions are determined by integration of corresponding instantaneous powers on the period of T supply voltage. The pulsations levels of active and reactive powers are appraised according to the root-mean-squares of pulsation powers. The pulsations level of component powers from loading unsymmetry is appraised by means of root-mean-squares of reverse sequence conditional powers. Components of distortion complex power are determined by integration of the distinguished sixth harmonic component of instantaneous powers for distortion in the period of T supply voltage. From the other side the complex values of distortion powers are determined as vectorial product of vectors of tension complex and separate sequences currents. Exactness of powers determination depends on taking into account the tension and reverse sequence current. Analysis of components vibrations for active and reactive powers, predefined by non-sinusoidal character, showed the presence of component powers of the twelfth harmonic component. Their level does not exceed 1% powers of the sixth harmonic component that is why its influence is possible to be ignored. Offered dividing of pulsating power into two components gives an opportunity to define reasons of indexes worsening of electric power quality in case of the asymmetrical non-sinusoidal loading composition. References 20, figures 3.

Key words: electrical networks, asymmetric sinusoidal mode, the definition of a oscillating power.

1. Shydlovskiy A.K., Kuznetsov V.H. Improving power quality in electrical networks. Kyiv: Naukova dumka, 1985. 268 p. (Rus)
2. Krogeris A.F., Rashevits K.K., Treimanis Je.P., Shinka Ja.K. Power AC. Riga: Fiziko-energeticheskii institut Latviiskoi Akademii Nauk, 1993. 294 p. (Rus)
3. Melnikov N.A. Reactive power consumption in the network of electrical. Moskva: Energiia, 1975. 128 p. (Rus)
4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press, Wiley-Interscience, 2007. 379 p.
5. Czarnecki L.S. Constraints of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory. *IET Power Electronics*. 2014. Vol. 7. No 9. Pp. 2201–2208.
6. Watanabe E.H., Stephan R.M., Aredes M. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. *IEEE Trans. Power Delivery*. 1993. Vol. 8. No 2. Apr. Pp. 697–703.
7. Watanabe E.H., Aredes M., Akagi H. The p-q theory for active filter control: some problems and solutions. *Revista Controle & Automacao*. 2004. Vol. 15. No 1. Pp. 78–84.
8. Nabae A., Tanaka T. A new definition of instantaneous active – reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1996. Vol. 11. No 3. Pp. 1238–1244.
9. Czarnecki L.S. Comments on active power flow and energy accounts in electrical systems with nonsinusoidal waveforms and asymmetry. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 1996. Vol. 11, No 3. Pp. 1244–1250.
10. Czarnecki L.S. On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory. *IEEE Trans. On Power Electronics*. 2004. Vol. 19, No 3. Pp. 828–836.
11. Czarnecki L.S. Effects of supply voltage asymmetry on IRP p-q theory based switching compensator control. *IET Power Electronics*. 2010. Vol. 3. No 1. Pp. 11–17.
12. Tolbert L.M., Halbetler T.G. Comparison of time based non-active power definitions for active filtering. *Power Electronics Congress. Acapulco, Mexico*. 2000. Vol. 1. Pp. 73–79.
13. Kale M., Ozdemir E. Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage. *Electric Power Systems Research*. 2005. Res 77. Pp. 363–370.
14. Kolb A.A. Group power supply systems for drives with capacitive accumulators and parallel active filters. *Elektrotekhnicna ta kompiuterni systemy*. 2011. Vol. 03(79). Pp. 404–407. (Rus).
15. Andrzej Firlit. Power Theory with Non-sinusoidal Waveforms. Annex 3. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. Pp. 27–51.
16. Burbelo M.Y., Hadai A.V. Determination of three-phase nonlinear loads electric. *Kompiuterno-intehrovani tekhnohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*. 2016. No 24–25. Pp. 61–67. (Ukr).
17. Burbelo M.Y., Hadai A.V., Melnychuk S.M., Loboda Yu.V. Determination of capacities of loads of three-phase electric networks in nonsinusoid and asymmetric modes. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2017. No 1. Pp. 51–56. (Ukr).
18. Burbelo M.Y., Melnychuk S.M., Nykytenko M.V. Measurement of parameters of asymmetrical quick-change three-phase loadings. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2011. No 2. Pp. 54–56. (Ukr).
19. Burbelo M.Y., Melnychuk S.M. Determination powers at unsymmetrical modes of three-phase networks with grounded neutral. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 71–75. (Ukr).
20. Pukhov G.E. Power Systems Theory periodic multiphase currents. *Elektrichestvo*. 1953. No 2. Pp. 56–61.

Надійшла 05.04.2018

Остаточний варіант 08.08.2018