

УДК 621.317.7

Бурбело М. Й.¹, Гадай А. В.², к.т.н.

¹ - Вінницький національний технічний університет

² - Луцький національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТЕЙ НЕЛІНІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Бурбело М. Й., Гадай А. В. Визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж.

В статті проаналізовано можливість застосування класичної та миттєвої теорій потужностей для визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж із заземленою нейтраллю. Показано, що найкращим є застосування класичної теорії потужностей. Введено поняття ефективних на періоді напруги живлення активної, реактивної та повної потужностей, а також їх середньоквадратичних відхилень. Показано, що останні є потужностями пульсацій, а ті, в свою чергу, є сумою потужностей небалансу та гармонічних спотворень. Запропоновано для визначення потужності спотворень використовувати середньоквадратичні значення різниці потужностей пульсацій та небалансу. Показано, що потужність спотворення, зумовлену наявністю канонічних гармонік, достатньо вимірювати на частоті шостої гармоніки напруги живлення з використанням миттєвих та комплексних потужностей.

Ключові слова: трифазні електричні мережі, нелінійні навантаження, визначення потужностей.

Burbelo M. I., Gada A. V. Определение мощности нелинейных нагрузок трехфазных электрических сетей. В

статье проанализирована возможность применения классической и мгновенной теорий мощностей для определения мощностей нелинейных нагрузок трехфазных электрических сетей с заземленной нейтралью. Показано, что наилучшим является применение классической теории мощностей. Введено понятие эффективных на периоде напряжения питания активной, реактивной и полной мощностей, а также их среднеквадратичных отклонений. Показано, что последние являются мощностями пульсаций, а те, в свою очередь, являются суммой мощностей небаланса и гармонических искажений. Предложено для определения мощности искажений использовать среднеквадратичные значение разницы мощностей пульсаций и небаланса. Показано, что мощность искажения, обусловленную наличием канонических гармоник, достаточно измерять на частоте шестой гармоника напряжения питания с использованием мгновенных и комплексных мощностей.

Ключевые слова: трехфазные электрические сети, нелинейные нагрузки, определение мощностей.

Burbelo M. J., Hada A. V. Determination of three-phase nonlinear loads electric. The article possibility to application

of classic and instantaneous theories of capacity is analysed for determination of powers nonlinear loading of three-phase electric networks with the earthed neutral. It is shown that the best is to use the classic theory of capacity. The concept of effective voltage on the period of active, reactive and apparent power and their rms deviations. It is shown that the rms deviations are ripple capacity, and those, in turn, are the sum of unbalance powers and harmonic distortions. It is suggested for determination of distortions power to use the rms value of difference of ripple power and unbalance power. It is shown that distortion power, predefined by the presence of the canonical harmonics, it is enough to measure the frequency of sixth canonical voltage using instantaneous and complex power.

Keywords: three-phase electrical network, nonlinear load, power determination.

Постановка наукової проблеми. Робота трифазних електричних мереж з нелінійним навантаженням, призводить до значних спотворень синусоїдності струму і напруги. Ця проблема особливо стосується мереж обмеженої потужності з короткими лініями зв'язку. До таких мереж відносяться з напівпровідниковими перетворювачами. В таких умовах стає важливим питання правильного визначення активної, реактивної та повної потужностей.

Аналіз досліджень. Класичний підхід до визначення потужностей в синусоїдних режимах трифазних електричних мереж оснований на використанні комплексної повної потужності як скалярного добутку векторів трифазних комплексних напруг і спряжених струмів [1]

$$\underline{S} = P + jQ = \left(\left| \dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{I}} \right| \right) = \left(\dot{U}_A \dot{I}_A^* + \dot{U}_B \dot{I}_B^* + \dot{U}_C \dot{I}_C^* \right), \quad (1)$$

де P, Q – активна та реактивна потужності; $\dot{\mathbf{U}}, \dot{\mathbf{I}}$ – вектори комплексних напруг і спряжених

струмів в фазних координатах, відповідно: $\left[\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C \right]^T, \left[\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C \right]^T$.

Реалізація вимірювальних перетворень полягає у формуванні миттєвих активної та реактивної потужностей як скалярного добутку векторів трифазних миттєвих напруг і струмів [2, 3]:

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

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

де $\mathbf{U}, \mathbf{U}', \mathbf{I}$ – вектори напруг і струмів в 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 за допомогою перетворення Гільберта. Однак реалізація такого перетворення є достатньо складною [4].

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

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt; \quad Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt. \quad (4)$$

За умов несинусоїдності класичний підхід відповідає теорії потужності К. Будяну, згідно з якою активна та реактивна потужності дорівнюють сумі, відповідно, активних та реактивних потужностей окремих гармонік:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n; \quad Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n, \quad (5)$$

а для виконання умови ортогональності вводиться поняття потужності спотворення D як третьої складової, що зумовлена гармонічними спотвореннями напруг і струмів

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2. \quad (6)$$

Поряд з класичним визначенням реактивної потужності використовують поняття реактивної потужності за С. Фрізе, який запропонував визначати реактивну потужність в несинусоїдних режимах як ортогональну складову, прийняту для синусоїдних величин. Вимірювання реактивної потужності за С. Фрізе полягає у виконанні перетворень

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}; \quad S = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C, \quad (7)$$

де $U_A, I_A; U_B, I_B; U_C, I_C$ – діючі значення напруг та струмів відповідних фаз, які за несинусоїдних напруг і струмів визначають за формулами, наприклад, для фази A :

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_A^2 dt}, \quad I_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_A^2 dt}. \quad (8)$$

Сучасний підхід до визначення потужностей полягає у використанні миттєвої повної потужності трифазної системи $s(t)$ в якості базової величини, яку розкладають на ортогональні складники [7]. Вираз для квадрата миттєвої повної потужності можна подати у вигляді суми квадратів скалярного та векторного добутків векторів трифазних напруг і струмів в системі фазних координат

$$s^2 = p^2 + q_{\Sigma}^2 = (|\mathbf{I} \cdot \mathbf{U}|)^2 + (|\mathbf{I} \times \mathbf{U}|)^2, \quad (9)$$

де \mathbf{I}, \mathbf{U} – вектори струмів і напруг в системі фазних координат $\mathbf{I} = [i_A, i_B, i_C]^T$, $\mathbf{U} = [u_A, u_B, u_C]^T$;

У разі застосування системи фазних координат миттєву активну потужність визначають за формулою (2), а вираз для миттєвої реактивної потужності має такий вигляд:

$$q_{\Sigma} = (|\mathbf{I} \times \mathbf{U}|) = \sqrt{\begin{vmatrix} i_A & i_B \\ u_A & u_B \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_B & i_C \\ u_B & u_C \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_C & i_A \\ u_C & u_A \end{vmatrix}^2}. \quad (10)$$

Миттєву реактивну потужність q_{Σ} можна також визначити з умови ортогональності за виразом

$$q_{\Sigma} = \sqrt{s^2 - p^2} = \sqrt{u^2 \cdot i^2 - p^2}, \quad (11)$$

де $u^2 = u_A^2 + u_B^2 + u_C^2$; $i^2 = i_A^2 + i_B^2 + i_C^2$.

Необхідно відмітити, що ортогональність складників миттєвої теорії потужностей справедлива лише для миттєвих значень і не виконується для усереднених величин. Якщо, наприклад, визначити

$$S = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt; \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt; \quad Q_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T q_{\Sigma}(t) dt, \quad (12)$$

то умова $S^2 = P^2 + Q_{\Sigma}^2$ не виконується.

Виконання умов ортогональності можна було б забезпечити у випадку формування ефективних інтегральних величин з використанням таких виразів

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt}; \quad P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}; \quad Q_{\Sigma e} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T q_{\Sigma}^2(t) dt}; \quad (13)$$

однак доцільність їх введення вимагає додаткових досліджень.

Обґрунтування результатів дослідження. Розглянемо несинусоїдний режим, за якого до мережі приєднаний шестипульсний випрямляч, який моделюється, за допомогою середовища Simulink 7.6 (R2010b), джерелом струму. Джерело містить першу, п'яту та сьому гармоніки, що становлять відповідно 20 % та 14,3 % від основної гармоніки, а напруги фаз крім першої гармоніки містять п'яту та сьому гармоніки, вміст кожної з яких становить 2 % від основної гармоніки (вказаний рівень напруг вищих гармонік відповідає відносному опору мережі, що визначається як відношення повних потужностей навантаження і короткого замикання, рівному 0,02).

Проаналізуємо спочатку симетричний по фазах режим навантажень. Потужність окремих гармонік становить: $S_1 = 1500 e^{j30^\circ} = 1299 + j750$ кВ·А; $\underline{S}_5 = -6 e^{j30^\circ} = -5,2 - j3$ кВ·А; $\underline{S}_7 = -4,3 e^{j30^\circ} = -3,7 - j2,1$ кВ·А. Результати вимірювань активної та реактивної потужностей відповідно будуть: $P \approx 1290$ кВт, $Q \approx 744,9$ квар. Значення реактивної потужності за С. Фрізе $Q_F \approx 850,9$ квар. Результати вимірювань ефективних повної, активної та реактивної потужностей відповідно будуть: $S_e = 1545$ кВ·А, $P_e \approx 1307$ кВт, $Q_e = Q_{\Sigma e} \approx 824,3$ квар.

Отже, в несинусоїдних симетричних режимах виміряні потужності, що відповідають класичній теорії потужностей, дають занижений результат, оскільки з мережі споживається активна потужність на основній гармоніці, що становить 1299 кВт, а генерується в мережу 5,2 кВт і 3,7 кВт, відповідно на п'ятій і сьомій гармоніках, спотворюючи форму напруги в мережі. При цьому споживач сплачує за сумарною активною потужністю на основній і вищих гармоніках, відповідно до показів лічильників електроенергії, тобто за 1290 кВт. Аналогічна ситуація спостерігається зі споживанням і оплатою за перетоки реактивної потужності.

Водночас, значення реактивної потужності за С. Фрізе та ефективних реактивних потужностей істотно завищують споживану реактивну потужність, оскільки включають в себе гармонічні спотворення як активної, так і реактивної потужностей.

В табл. 1. наведено результати розрахунків потужностей для шести режимів: 1) несинусоїдний симетричний режим (НСР), який було розглянуто вище; 2) несинусоїдний несиметричний режим (ННР), який відрізняється від розглянутого зниженням напруги та струму фази С на 10%; 3) синусоїдний несиметричний режим зі зниженням напруги та струму фази С на 10% (СНР); 4) несинусоїдний несиметричний режим з обривом фази С (ННРО); 5) несинусоїдний несиметричний режим з обривом фази С і 50% провалом напруги на фазі С (ННРОП); 6) синусоїдний несиметричний режим з обривом фази С (СНРО).

Таблиця 1. Результати розрахунків потужностей

Режим	P_1 , кВт	Q_1 , квар	P , кВт	Q , квар	Q_F , квар	P_e , кВт	Q_e , квар	$Q_{\Sigma e}$, квар
1) НСР	1299	750	1290	745	851	1307	824	824
2) ННР	1217	703	1208	698	797	1226	775	770
3) СНР	1217	703	1217	703	703	1219	706	701
4) ННРО	866	500	860	497	568	945	659	837
5) ННРОП	866	500	860	497	568	945	659	587
6) СНРО	866	500	866	500	501	936	613	791

Ефективні активна P_e та реактивна Q_e потужності завжди більші від потужностей на основній гармоніці, а також від усереднених на періоді потужностей. Водночас, ефективна реактивна потужність $Q_{\Sigma e}$ в несиметричних режимах може бути як більшою, так і меншою від потужності на основній гармоніці, а також від усередненої на періоді потужності. Особливо неприємним є відмінність цієї потужності в режимах 4) і 5), які відрізняються значенням напруги на обірваній фазі. Фізична суть нестабільності потужності пояснюється використанням модуля трифазної напруги, який, наприклад, в режимі обриву фази не впливає на струм навантаження, проте його значення впливає на результат вимірювань потужності.

Проаналізуємо можливість визначення потужності гармонічних спотворень. Для цього пропонується використати поняття ефективних активної та реактивної потужностей, визначених на періоді напруги живлення:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}; \quad Q_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt}, \quad (14)$$

а також середньоквадратичні відхилення активної, реактивної та повної потужностей

$$\sigma_p = \sqrt{P_e^2 - P^2}; \quad \sigma_q = \sqrt{Q_e^2 - Q^2}; \quad \sigma_s = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_q^2}. \quad (15)$$

Значення середньоквадратичних відхилень активної, реактивної та повної потужностей в режимі 1) будуть: $\sigma_p = 210$ кВт; $\sigma_q = 353$ квар; $\sigma_s = 411$ кВ·А.

Потужності гармонічних спотворень s_p та s_q за відсутності несиметрії напруг та струмів можна записати через потужності пульсацій n_p та n_q у такому вигляді:

$$s_p = n_p = (p - P); \quad s_q = n_q = (q - Q). \quad (16)$$

Значення потужностей спотворень можна визначити шляхом інтегрування квадратів миттєвих потужностей пульсацій на періоді T напруги живлення

$$S_p = N_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_p^2(t) dt}; \quad S_q = N_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_q^2(t) dt}. \quad (17)$$

Значення $S_p = 210$ кВт; $S_q = 353$ квар; $S_s = \sqrt{S_p^2 + S_q^2} = 411$ кВ·А.

На рис. 1 зображено залежності миттєвих величин p, q для режиму 1), з якого видно, що миттєві потужності мають рівномірний характер пульсацій, зумовлений лише несинусоїдністю і що частота коливань миттєвих потужностей в шість разів вища від частоти напруги мережі.

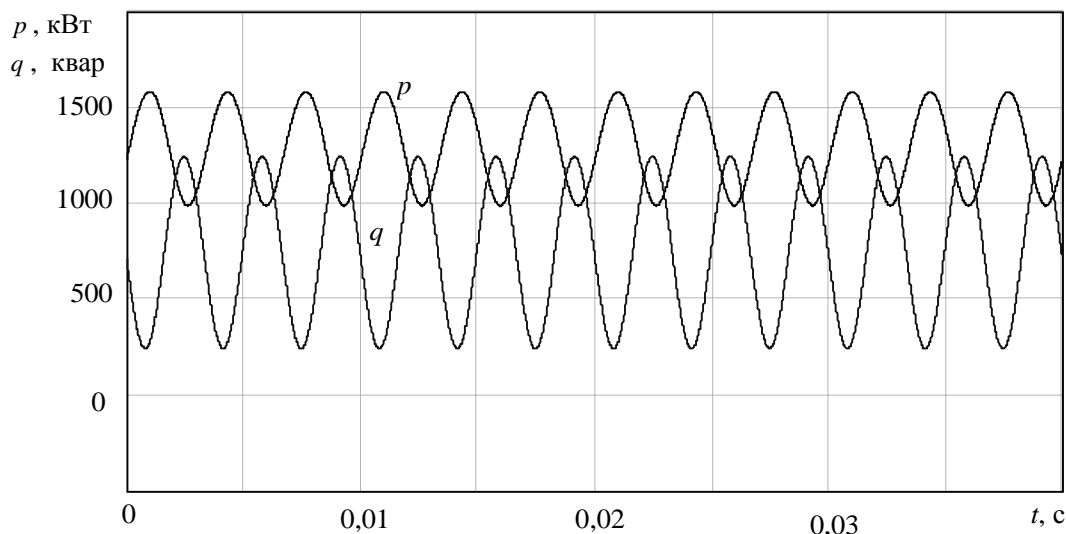


Рис. 1. Залежності миттєвих активної та реактивних потужностей за несинусоїдності

Потужності спотворень можна виміряти шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення

$$\operatorname{Re} \underline{S}_p = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T s_p \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_p = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T s_p \cos 6\omega t dt. \quad (18)$$

$$\operatorname{Re} \underline{S}_q = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T s_q \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_q = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T s_q \cos 6\omega t dt. \quad (19)$$

Комплексні значення потужностей спотворень, які визначені за миттєвими значеннями на частоті, що відповідає шостій гармоніці напруги, будуть: $\underline{S}_p = 210e^{-j14,5^\circ}$ кВ·А, $\underline{S}_q = 353e^{-j175^\circ}$ кВ·А.

Комплексні значення потужності спотворення можна визначити за векторним добутком векторів комплексних напруг і струмів окремих послідовностей, розмірність яких залежить від кількості врахованих гармонік. Шляхом комп'ютерного моделювання встановлено, що у разі врахування комбінаційних складників, що зумовлені першою, п'ятою та сьомою гармоніками прямої послідовності, комплексні значення потужності спотворення визначаються з таких виразів:

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

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

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

Розраховані за формулами (20) – (21) комплексні значення потужності спотворення відповідно будуть: $\underline{S}_p = 210e^{-j14,5^\circ}$ кВ·А, $\underline{S}_q = 353e^{-j175^\circ}$ кВ·А.

Отже, за усіх чотирьох способів оцінювання потужності гармонічних спотворень отримано однаковий результат.

Необхідно відмітити, що за відсутності несиметрії напруг і струмів потужність гармонічних спотворень можна визначити і через реактивні потужності: $S_s = \sqrt{Q_F^2 - Q^2} = 411$ кВ·А.

За несиметрії напруг і струмів, наприклад, у разі провалу напруги фази С на 10 % від значення напруг інших фаз миттєві потужності p та q характеризуються змінним коливним процесом протягом пів періоду, що зумовлено несиметрією та несинусоїдністю. Обвідні цих потужностей характеризують пульсації, що зумовлені несиметрією режиму за зворотною послідовністю.

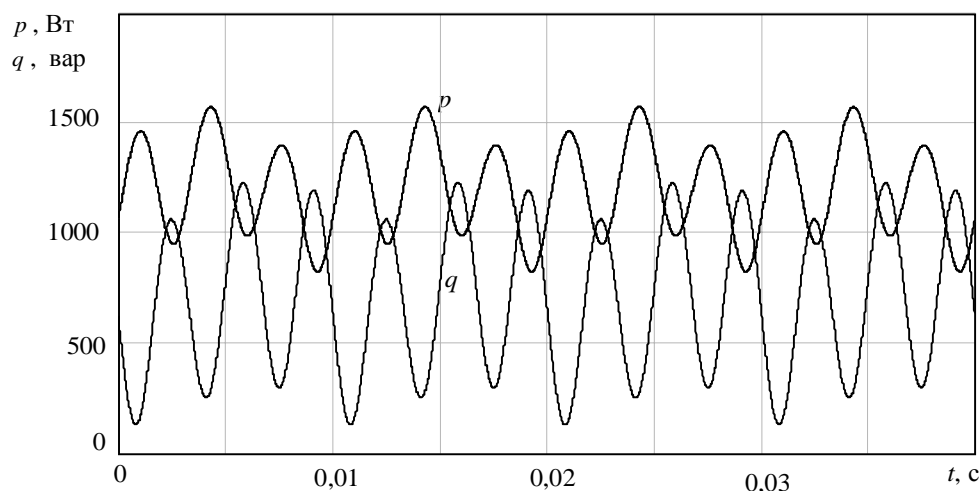


Рис. 2. Залежності миттєвих активної та реактивних потужностей за несиметрії та несинусоїдності

Складники потужності небалансу, що зумовлені несиметрією напруг і струмів, представимо миттєвими умовними потужностями зворотної послідовності [6, 7]:

$$p_2 = u_\alpha i_\alpha - u'_\beta i'_\beta; \quad q_2 = u'_\alpha i_\alpha + u_\beta i'_\beta, \quad (22)$$

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.

Несинусоїдний характер цих потужностей (рис. 3) свідчить про наявність комбінаційних складників, зумовлених взаємовпливом основної та вищих гармонік різних послідовностей.

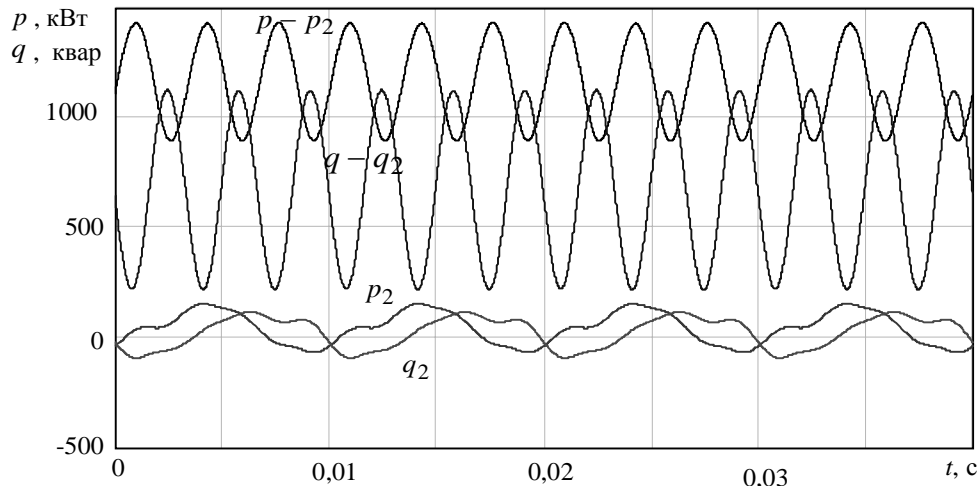


Рис. 3. Залежності миттєвих умовної потужності несиметрії та потужності спотворення

Умовні потужності зворотної послідовності визначають шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T p_2(t) dt; \quad Q_2 = \frac{1}{T} \int_0^T q_2(t) dt. \quad (23)$$

Припустивши, що потужність пульсацій є сумою потужностей, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю

$$n_p = s_p + (p_2 - P_2); \quad n_q = s_q + (q_2 - Q_2), \quad (24)$$

миттєві потужності гармонічних спотворень доцільно подати у такому вигляді:

$$s_p = (p - P) - (p_2 - P_2); \quad s_q = (q - Q) - (q_2 - Q_2). \quad (25)$$

Значення середньоквадратичних відхилень активної, реактивної та повної потужностей будуть: $\sigma_p = 208,4$ кВт; $\sigma_q = 337,9$ квар; $\sigma_s = 397,0$ кВ·А. Розраховані за формулами (17), (24) значення потужностей пульсацій будуть: $N_p = 208,5$ кВт; $N_q = 338,0$ квар; $N_s = \sqrt{N_p^2 + N_q^2} = 397,2$ кВ·А. З розрахованих за формулами (17), (25) значення потужностей гармонічних спотворень будуть: $S_p = 189,9$ кВт; $S_q = 319,5$ квар; $S_s = \sqrt{S_p^2 + S_q^2} = 371,7$ кВ·А. Комплексні значення потужностей спотворень, що визначені за миттєвими значеннями на частоті шостої гармоніки напруги, будуть: $\underline{S}_p = 189,9e^{-j14,5^\circ}$ кВ·А, $\underline{S}_q = 319,5e^{-j175^\circ}$ кВ·А.

Розраховані за формулами (20) – (21) комплексні значення потужності спотворення відповідно будуть: $\underline{S}_p = 196,0e^{-j14,5^\circ}$ кВ·А, $\underline{S}_q = 329,8e^{-j175^\circ}$ 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.

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 (20), (21) набудуть вигляду

$$\begin{aligned} \underline{S}_{p,6} \approx & \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Im} \left[\left(\dot{U}_{11} \dot{I}_{15}^* - \dot{U}_{15} \dot{I}_{11}^* \right) + \left(\dot{U}_{11} \dot{I}_{17}^* - \dot{U}_{17} \dot{I}_{11}^* \right) - \left(\dot{U}_{11} \dot{I}_{25}^* - \dot{U}_{25} \dot{I}_{11}^* \right) - \right. \\ & \left. - \left(\dot{U}_{11} \dot{I}_{27}^* - \dot{U}_{27} \dot{I}_{11}^* \right) - \left(\dot{U}_{21} \dot{I}_{15}^* - \dot{U}_{15} \dot{I}_{21}^* \right) - \left(\dot{U}_{21} \dot{I}_{17}^* - \dot{U}_{17} \dot{I}_{21}^* \right) \right] + \\ & + j \frac{3}{\sqrt{2}} \operatorname{Re} \left[- \left(\dot{U}_{11} \dot{I}_{15} + \dot{U}_{15} \dot{I}_{11} \right) + \left(\dot{U}_{11} \dot{I}_{17} + \dot{U}_{17} \dot{I}_{11} \right) + \left(\dot{U}_{11} \dot{I}_{25} + \dot{U}_{25} \dot{I}_{11} \right) - \right. \\ & \left. - \left(\dot{U}_{11} \dot{I}_{27} + \dot{U}_{27} \dot{I}_{11} \right) + \left(\dot{U}_{21} \dot{I}_{15} + \dot{U}_{15} \dot{I}_{21} \right) - \left(\dot{U}_{21} \dot{I}_{17} + \dot{U}_{17} \dot{I}_{21} \right) \right]; \end{aligned} \quad (26)$$

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

а комплексні значення потужності спотворення відповідно будуть: $\underline{S}_p = 189,2e^{-j14,5^\circ}$ кВ·А,
 $\underline{S}_q = 318,5e^{-j175^\circ}$ кВ·А.

Зазначимо, що за наявності несиметрії напруг і струмів $\sqrt{Q_F^2 - Q^2} = 385,4$ квар не несе інформації ні про потужність пульсацій, ні про потужність спотворень.

Висновки. Проаналізовано можливості визначення потужності спотворення нелінійних навантажень трифазних електричних мереж із заземленою нейтраллю з використанням класичної та миттєвої теорії потужностей. Показано, що найкращим є застосування класичної теорії потужностей. Введено поняття ефективних на періоді напруги живлення активної, реактивної та повної потужностей, а також середньквадратичних відхилень на періоді напруги живлення активної, реактивної та повної потужностей. Показано, що для визначення потужності спотворення можна використовувати середньквадратичні відхилення на періоді напруги живлення активної, реактивної та повної потужностей. Показано, що потужність спотворення, зумовлену наявністю канонічних гармонік, достатньо вимірювати на частоті шостої гармоніки напруги живлення.

1. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – Т.1. – 536 с.
2. Тонкаль И. Е. Баланс энергий в электрических цепях / И. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк [и др.]; – К.: Наукова Думка, 1992. – 312 с.
3. Мощность переменного тока / А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевец, Э. П. Трейманис, Я. К. Шинка. – Рига: Физ.-энерг. инст. Латв.АН, 1993. – 294 с.
4. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) / Г. А. Штамбергер; Под ред. К. Б. Карандеева. – Новосибирск: Наука, 1975. – 164 с.
5. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. – IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007. – 379 p.
6. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54–56.
7. Бурбело М. Й. Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 71–75.