

## ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА НИЗЬКОВОЛЬТНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет;

<sup>2</sup>ТОВ ІТЦ «Енергооблік»

Проаналізована можливість виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень (несиметрії та вищих гармонік) на якість електроенергії трифазних мереж з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей. Такими джерелами є нелінійні споживачі, частка яких в загальному навантаженні з кожним роком зростає. Нелінійні споживачі споживають активну потужність на основній частоті і водночас генерують в мережу потужність на вищих гармоніках. Значною в низьковольтних мережах також є частка споживачів з несиметричним навантаженням фаз. На основі теорії миттєвої потужності виділено миттєві величини, на основі яких можна сформувати інформативні величини, які дозволяють характеризувати вплив нелінійних та несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії, а також оцінити неефективність розподільної мережі електропостачальної організації.

Для оцінювання впливу нелінійних та несиметричних споживачів доцільно використовувати миттєві умовні потужності  $p_{i_2}, q_{i_2}$  та  $p_{i_0}, q_{i_0}$ , які по суті є добутком миттєвих значень напруги прямої послідовності на струм зворотної та нульової послідовності, а для оцінювання провини електропостачальної організації, яка полягає в неефективній побудові розподільної мережі — миттєві умовні потужності  $p_{u_2}, q_{u_2}$  та  $p_{u_0}, q_{u_0}$ , які по суті є добутком миттєвих значень струму прямої послідовності на напругу зворотної та нульової послідовності. Формування цих величин здійснюється з використанням системи  $\alpha, \beta, 0$ -координат, що істотно спрощує побудову вимірювальних пристроїв.

За наявності гармонічних спотворень середньоквадратичні значення умовних потужностей  $p_{i_2}, q_{i_2}$  та  $p_{i_0}, q_{i_0}$  зростають і становлять від одного до десяти відсотків відносно основної потужності, що створюється напругою та струмом основної частоти прямої послідовності. У разі несиметрії навантажень збільшуються середні значення цих величин. Водночас збільшення  $p_{u_2}, q_{u_2}$  та  $p_{u_0}, q_{u_0}$  свідчить про недостатню потужність силових трансформаторів та недоцільність застосування трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «зірка/зірка з нулем» для живлення нелінійних споживачів.

**Ключові слова:** електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, виявлення джерел спотворень.

### Постановка проблеми

Особливої актуальності в останні роки набула проблема стимулювання споживачів до підвищення якості електроенергії (ЯЕЕ) в низьковольтних електричних мережах. Нелінійні несиметричні навантаження споживачів є джерелами вищих гармонік, трифазних симетричних складових зворотної та нульової послідовностей. Можна вважати [1], що окрім основного потоку енергії з мережі до навантаження, що визначається симетричною складовою прямої послідовності основної гармоніки, для нелінійних і несиметричних навантажень існує вторинний потік енергії, направлений в електричну мережу, що зумовлений вищими гармоніками та симетричними складовими зворотної та нульової послідовностей. Вторинні потоки енергії знижують якість електричної енергії, збільшують її втрати.

Найпоширенішим для оцінювання впливу джерел вищих гармонік та несиметричних навантажень на погіршення ЯЕЕ є метод з використанням дольового внеску споживачів в спотворення

напруги [2]—[4]. Дольовий внесок (ДВ) від джерел гармонічних складових струму або джерел струму зворотної та нульової послідовностей визначають як модуль вектора напруги  $n$ -ї гармоніки або модуль вектора напруги зворотної та нульової послідовності, що створює певний суб'єкт в точці загального приєднання (ТЗП). ДВ  $k$ -го приєднання в рівень  $n$ -ї гармонічної складової (ГС) або  $s$ -ї симетричної складової (СС) у вузлі мережі визначається за виразом

$$\dot{U}_{(n)k}^{DB} = \dot{I}_{(n)k} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{(n)m}; \quad \dot{U}_{(s)k}^{DB} = \dot{I}_{(s)k} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{(s)m}, \quad (1)$$

де  $\dot{I}_{(n)k}$  — комплексний струм  $n$ -ї ГС для  $k$ -го приєднання;  $\underline{Y}_{(n)m}$  — комплексна провідність навантаження на  $n$ -й ГС для  $m$ -го приєднання;  $\dot{I}_{(s)k}$  — комплексний струм  $s$ -ї СС для  $k$ -го приєднання;  $\underline{Y}_{(s)m}$  — комплексна провідність навантаження на  $s$ -й СС для  $m$ -го приєднання;  $M$  — кількість приєднань у вузлі мережі.

Для експериментального визначення відповідальності споживача за погіршення ЯЕЕ використовуються вторинні активна та реактивна потужності для  $n$ -ї ГС та  $s$ -ї СС на межі балансової належності. Вираз для визначення вторинної активної потужності має такий вигляд [1]

$$P_{em} = 3U_{21}I_{21} \cos \phi_{21} + 3U_{01}I_{01} \cos \phi_{01} + \sum_n 3U_{1n}I_{1n} \cos \phi_{1n} + \sum_n (3U_{2n}I_{2n} \cos \phi_{2n} + 3U_{0n}I_{0n} \cos \phi_{0n}), \quad (2)$$

де  $U_{sn}, I_{sn}$  — напруга і струм  $s$ -ї послідовності  $n$ -ї гармоніки;  $\phi_{1n}$  — кут зсуву фаз між напругою і струмом  $s$ -ї послідовності  $n$ -ї гармоніки.

Якщо складники потужності  $s$ -ї послідовності  $n$ -ї гармоніки від'ємні, то вони направлені від джерела спотворення в мережу і споживачі повинні нести відповідальність за зниження показників ЯЕЕ.

Недоліком використання активних і реактивних потужностей  $s$ -ї послідовності  $n$ -ї гармоніки є їх відносно малі значення (десяті, соті долі відсотка від потужностей основної гармоніки прямої послідовності).

В [5] запропоновано використовувати потужності спотворення, які визначають як добутки номінальної напруги на комплексні струми для  $n$ -ї ГС та  $s$ -ї СС.

За наявності одночасно декількох джерел спотворень в мережі напрямки перетоків активних та реактивних потужностей, а також потужностей спотворення для  $n$ -ї ГС та  $s$ -ї СС можуть змінюватися [6]. В [7], [8] пропонується оцінювати вплив нелінійного споживача на основі статистичної обробки результатів спостережень активної (реактивної) потужності  $n$ -ї ГС.

*Мета роботи* полягає в оцінюванні впливу джерел вищих гармонік на якість електроенергії в електричній мережі з використанням умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей, отриманих на основі теорії миттєвих потужностей.

### Теорія миттєвих потужностей

Сучасний підхід до визначення потужностей трифазних навантажень за умов несиметрії та не-синусоїдності полягає у використанні миттєвої повної потужності трифазної системи  $s(t)$  в якості базової величини, яку розкладають на ортогональні складники [9]. Вираз для квадрата миттєвої повної потужності можна подати у вигляді суми квадратів скалярного та векторного добутків векторів трифазних напруг і струмів

$$s^2 = (\mathbf{I} \cdot \mathbf{U})^2 + (\mathbf{I} \times \mathbf{U})^2, \quad (3)$$

де  $\mathbf{I}, \mathbf{U}$  — вектори струмів і напруг в системі фазних координат  $[i_A, i_B, i_C]^T, [u_A, u_B, u_C]^T$  або системі  $\alpha, \beta, 0$ -координат  $[i_\alpha, i_\beta, i_0]^T, [u_\alpha, u_\beta, u_0]^T$ .

Скалярний та векторний добутки виразу (3) є відповідно миттєвими активною та реактивною потужностями. У разі застосування системи фазних координат вирази для миттєвих активної та реактивної потужностей відповідно будуть такими:

$$p = (\mathbf{I} \cdot \mathbf{U}) = (i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C); \quad (4)$$

$$q = (\mathbf{I} \times \mathbf{U}) = \sqrt{\left| \begin{matrix} i_A & i_B \\ u_A & u_B \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} i_B & i_C \\ u_B & u_C \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} i_C & i_A \\ u_C & u_A \end{matrix} \right|^2}. \quad (5)$$

У разі застосування системи  $\alpha, \beta, 0$ -координат вирази для миттєвих активної та реактивної потужностей, відповідно, будуть мати вигляд

$$p = (\mathbf{I}_p \cdot \mathbf{U}_p) = (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta + i_0 u_0); \quad (6)$$

$$q = (\mathbf{I}_p \times \mathbf{U}_p) = \sqrt{\left| \begin{matrix} i_\alpha & i_\beta \\ u_\alpha & u_\beta \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} i_\beta & i_0 \\ u_\beta & u_0 \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} i_0 & i_\alpha \\ u_0 & u_\alpha \end{matrix} \right|^2}. \quad (7)$$

З виразу (7) випливає, що миттєва реактивна потужність містить три складники

$$q_0 = i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha; \quad (8)$$

$$q_\beta = i_0 u_\alpha - i_\alpha u_0; \quad q_\alpha = i_\beta u_0 - i_0 u_\beta. \quad (9)$$

Складник  $q_0$  відповідає поняттю миттєвої реактивної потужності для мережі з ізольованою нейтраллю. Два інших складники характеризують появу напруги, струму нульової послідовності в мережі із заземленою нейтраллю.

Наявність спотворень, зумовлених струмом і напругою зворотної послідовності, доцільно характеризувати умовними потужностями зворотної послідовності [10]

$$p_{2p} = u_\alpha i_\alpha - u'_\beta i'_\beta; \quad q_{2p} = u'_\alpha i_\alpha + u_\beta i'_\beta; \quad (10)$$

$$p_{2q} = u_\alpha i'_\beta - u'_\beta i_\alpha; \quad q_{2q} = u_\beta i_\alpha + u'_\alpha i'_\beta, \quad (11)$$

де штрихом позначено напруги і струми, які утворюють шляхом фазового зсуву на  $-90$  ел. градусів відносно основної гармоніки напруг і струмів.

Складники миттєвих умовних потужностей (10), (11) мають постійні складові, які є інформативними параметрами, які можна використати для виявлення несиметричних режимів за зворотною послідовністю. Змінні складові  $p_{2p}$ ,  $q_{2q}$  збігаються зі змінними складовими потужностей, відповідно,  $p$ ,  $q_0$  і характеризують їх пульсації.

Миттєві умовні потужності (10), (11) можуть бути записані через симетричні складові напруг і струмів прямої та зворотної послідовностей, відповідно [10]

$$p_{2p} = 3(u_1 i_2 + u_2 i_1); \quad q_{2p} = 3(u'_1 i_2 + u'_2 i_1); \quad (12)$$

$$p_{2q} = 3(u_1 i_2 - u_2 i_1); \quad q_{2q} = 3(u'_1 i_2 - u'_2 i_1). \quad (13)$$

Складники  $q_\beta$  і  $q_\alpha$  теж мають постійні складові, які є інформативними параметрами несиметричних режимів за нульовою послідовністю. Встановлено, що умовні потужності  $q_\beta$  і  $q_\alpha$  можна виразити через узагальнені симетричні складові миттєвих напруг і струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей у вигляді [10]

$$\sqrt{2}q_\beta = p_{01} + p_{02}; \quad \sqrt{2}q_\alpha = q_{01} + q_{02}, \quad (14)$$

де 
$$p_{01} = 3(u_1 i_0 - u_0 i_1); \quad p_{02} = 3(u_2 i_0 - u_0 i_2); \quad (15)$$

$$q_{01} = 3(u'_1 i_0 - u_0 i'_1); \quad q_{02} = 3(u'_2 i_0 - u_0 i'_2), \quad (16)$$

де  $u_1, i_1, u_2, i_2, u_0, i_0$  — напруги і струми прямої, зворотної та нульової послідовностей.

### Обґрунтування результатів дослідження

З (12), (13) можна обчислити окремі складники, які визначаються струмом і напругою зворотної послідовності

$$p_{i_2} = 3u_1 i_2 = 0,5(p_{2p} + p_{2q}); \quad q_{i_2} = 3u'_1 i_2 = 0,5(q_{2p} + q_{2q}); \quad (17)$$

$$p_{u_2} = 3u_2 i_1 = 0,5(p_{2p} - p_{2q}); \quad q_{u_2} = 3u_2' i_1 = 0,5(q_{2p} - q_{2q}). \quad (18)$$

Потужності (17), які пропорційні струму зворотної послідовності, характеризують спотворення, що виникають з вини споживачів, а потужності (18), які пропорційні напрузі зворотної послідовності, характеризують спотворення, що виникають в мережі живлення. Якщо потужності (18) перевищують деяке нормативне значення, то за перевищення має відповідати електропостачальна компанія.

Умовні потужності  $q_{\beta}$  і  $q_{\alpha}$  теж можна подати двома складниками

$$q_{\beta i_0} = i_0 u_{\alpha}; \quad q_{\beta u_0} = -i_{\alpha} u_0; \quad (19)$$

$$q_{\alpha i_0} = -i_0 u_{\beta}; \quad q_{\alpha u_0} = i_{\beta} u_0. \quad (20)$$

Перші складники цих величин характеризують струм нульової послідовності, другі — напругу нульової послідовності. Як і раніше, потужності, які пропорційні струму нульової послідовності, характеризують спотворення, що виникають з вини споживачів, а потужності, які пропорційні напрузі зворотної послідовності, характеризують спотворення, що виникають в мережі живлення. Якщо останні потужності перевищують деяке нормативне значення, то за перевищення має відповідати електропостачальна компанія.

Складникам (19), (20) відповідають умовні потужності

$$p_{i_0} = 3(u_1 i_0 + u_2 i_0); \quad p_{u_0} = -3(u_0 i_1 + u_0 i_2); \quad (21)$$

$$q_{i_0} = -3(u_1' i_0 + u_2' i_0); \quad q_{u_0} = 3(u_0 i_1' + u_0 i_2'). \quad (22)$$

Таким чином, для виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень (несиметрії та вищих гармонік) споживачів доцільно використовувати миттєві умовні потужності  $p_{i_2}, q_{i_2}$  та  $p_{i_0}, q_{i_0}$ , а для оцінювання впливу спотворень, що виникають в мережі з вини електропостачальної організації, — перевищення нормативних значень величин  $p_{u_2}, q_{u_2}$  та  $p_{u_0}, q_{u_0}$ . Водночас для їх вимірювання доцільно використовувати величини (10), (11) та (19), (20) які формуються вимірювальними пристроями простіше ніж миттєві симетричні складові.

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту, сьому, дев'яту, одинадцяту, ... гармоніки, амплітуди яких становлять приблизно 7 %, 2 %, 0,5 %, 0,2 %, 0,08 %, ..., відповідно, від амплітуди основної гармоніки. Потужність навантаження:  $\underline{S} = 123,8 + j46,8$  кВ·А. Живлення споживача здійснюється напругою 380 В від мережі електропостачальної організації через трансформатор потужністю 400 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем».

Середньоквадратичні значення миттєвих потужностей спотворення становлять:  $P_{ски_2} = 2,7$  кВ·А;  $Q_{ски_2} = 2,0$  кВ·А та  $P_{ски_0} = 9,5$  кВ·А,  $Q_{ски_0} = 9,5$  кВ·А, що свідчить про наявність вищих гармонік в струмах зворотної та нульової послідовностей. Особливо відчутним є вплив третьої гармоніки, яка утворює струм нульової послідовності. Середньоквадратичні потужності, зумовлені напругою зворотної та нульової послідовності значно менші:  $P_{ски_2} = 0,2$  кВ·А,  $Q_{ски_2} = 0,2$  кВ·А,  $P_{ски_0} = 0,4$  кВ·А,  $Q_{ски_0} = 0,4$  кВ·А.

За несиметричного режиму, наприклад, якщо струм фази С менший на 10 % від значення струмів інших фаз, виникають постійні складові, які характеризують несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями на основній гармоніці. Середні значення миттєвих потужностей  $P_{i_2} = 3,5$  кВ·А;  $Q_{i_2} = -2,8$  кВ·А,  $P_{i_0} = 0,7$  кВ·А,  $Q_{i_0} = -4,4$  кВ·А. Середні потужності, що зумовлені напругою зворотної та нульової послідовності близькі до нуля:  $P_{u_2} = 0,05$  кВ·А,  $Q_{u_2} = -0,05$  кВ·А, та  $P_{u_0} = 0,07$  кВ·А,  $Q_{u_0} = 0,02$  кВ·А. Середньоквадратичні значення центрованих миттєвих потужностей становлять  $P_{ски_2} = 4,3$  кВ·А;  $Q_{ски_2} = 3,5$  кВ·А та  $P_{ски_0} = 10,6$  кВ·А,  $Q_{ски_0} = 8,7$  кВ·А, що зумовлено несиметрією режиму на основній гармоніці та наявністю вищих гармонік в струмах зворотної та нульової послідовностей. Середньоквадратичні потужності, що зумовлені напругою зворотної та нульової послідовності, як і раніше, значно менші:  $P_{ски_2} = 0,2$  кВ·А,

$$Q_{ски_2} = 0,2 \text{ кВ}\cdot\text{А}, P_{ски_0} = 0,4 \text{ кВ}\cdot\text{А}, Q_{ски_0} = 0,4 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Коли живлення здійснюється від трансформатора потужністю 160 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем» середньоквадратичні значення миттєвих потужностей спотворення залишаються практично такими ж:  $P_{ски_2} = 2,6 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ;  $Q_{ски_2} = 2,0 \text{ кВ}\cdot\text{А}$  та  $P_{ски_0} = 9,3 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $Q_{ски_0} = 9,3 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ . Середньоквадратичні потужності, що зумовлені напругою зворотної та нульової послідовності більші:  $P_{ски_2} = 0,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $Q_{ски_2} = 0,4 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $P_{ски_0} = 1,1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $Q_{ски_0} = 1,1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ . Вони різко зростають якщо живлення здійснюється від трансформатора потужністю 160 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «зірка/зірка з нулем»:  $P_{ски_0} = 9,1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $Q_{ски_0} = 9,1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ .

Таким чином, використання запропонованих інформативних параметрів  $p_{u_2}, q_{u_2}$  та  $p_{u_0}, q_{u_0}$  одночасно стимулює електропостачальні організації до встановлення потужніших трансформаторів, що сприятиме покращенню якості електроенергії.

З наведених результатів випливає, що для виявлення та оцінювання гармонічних спотворень споживачами, які джерелами вищих гармонік, можна використовувати лише середньоквадратичні потужності  $P_{ски_2}$  та  $P_{ски_0}$ , для визначення яких використовуються миттєві потужності, відповідно,

$$p_{i_2} = 0,5(p_{2p} + p_{2q}) = 0,5(u_{\alpha} - u'_{\beta})(i_{\alpha} + i'_{\beta}) \text{ та } q_{\beta i_0} = i_0 u_{\alpha}, \text{ а для визначення гармонічних спотворень в мережі живлення можна використовувати лише середньоквадратичні потужності } P_{ски_2} \text{ та } P_{ски_0}, \text{ для визначення яких використовуються миттєві потужності, відповідно, } p_{u_2} = 0,5(p_{2p} - p_{2q}) = 0,5(u_{\alpha} + u'_{\beta})(i_{\alpha} - i'_{\beta}) \text{ та } q_{\beta u_0} = -i_{\alpha} u_0.$$

### Висновки

Для оцінювання впливу джерел спотворень (несиметрії та несинусоїдності) споживачів доцільно використовувати миттєві умовні потужності  $p_{i_2}, q_{i_2}$  та  $p_{i_0}, q_{i_0}$ , а для оцінювання неефективної побудови мережі електропостачальної організації —  $p_{u_2}, q_{u_2}$  та  $p_{u_0}, q_{u_0}$ . За наявності гармонічних спотворень середньоквадратичні значення умовних потужностей  $p_{i_2}, q_{i_2}$  та  $p_{i_0}, q_{i_0}$  зростають і становлять від одного до десяти відсотків відносно основної потужності. У разі несиметрії навантажень збільшуються середні значення цих величин. Водночас збільшення  $p_{u_2}, q_{u_2}$  та  $p_{u_0}, q_{u_0}$  свідчить про недостатню потужність силових трансформаторів та недоцільність застосування трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «зірка/зірка з нулем» для живлення таких споживачів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ф. А. Зыкин, «Энергетические процессы в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии,» *Электричество*, № 12, с. 5-9, 1987.
- [2] Ф. А. Зыкин, «Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии,» *Электричество*, № 11, с. 13-19, 1992.
- [3] В. Я. Майер, и Зения «Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии,» *Электричество*, № 9, с. 19-24, 1994.
- [4] CIGRE 36.05/CIREN 2 Joint WG CC02 (Voltage Quality). "Review of methods for measurement and evaluation of the harmonic emission level from an individual distorting load," 1999.
- [5] С. С. Смирнов, «Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети,» *Электричество*, № 1, с. 56-64, 1996.
- [6] Г. Сендерович, «Визначення часткової участі суб'єктів у порушенні якості електричної енергії.» автореферат дис. докт. техн. наук, Донецьк, 2012.
- [7] О. Гриб, Г. Сендерович, П. Щербакова, «Науково-технічні аспекти визначення відповідальності за порушення якості електричної енергії.» *Стандартизація сертифікація якості*, № 6, с. 48-55, 2013.
- [8] О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербакова, «Особенности визначення часткового вклада споживача у відповідальність за порушення синусоїдності кривої напруги,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 98-101, 2014.
- [9] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes., "Instantaneous power theory and applications to power conditioning," *IEEE Press, Wiley-Interscience*, p. 379, 2007.
- [10] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, «Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із землею нейтраллю,» *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 71-75, 2015.

**Бурбело Михайло Йосипович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com ;  
**Степура Олександр Васильович** — директор ТОВ ІТЦ «Енергооблік», Вінниця

**M. Yo. Burbelo<sup>1</sup>**  
**O. V. Stepura<sup>2</sup>**

## Evaluation of the Oscillating Power in Asymmetrical Non-Sinusoidal Modes of Electric Networks

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University;

<sup>2</sup>ITC "Energy Accounting" Ltd., Vinnitsia

*The possibility of detection and evaluation of the influence of distortion sources (asymmetry and higher harmonics) on the quality of electricity of three-phase networks using instantaneous conditional capacities of the reverse and zero sequences is analyzed. Such sources are nonlinear consumers, whose share in total load increases year by year. Nonlinear consumers consume active power at the main frequency and at the same time generate power to the higher harmonics in the network. Significantly in low voltage networks, there is also a share of consumers with asymmetric load of phases. On the basis of the theory of instantaneous power, instantaneous values are allocated on the basis of which informative values can be formed that allow characterizing the influence of nonlinear and asymmetric consumers on deterioration of the quality of electricity, as well as assessing the inefficiency of the distribution network of the electricity supplying organization.*

*To evaluate the impact of nonlinear and asymmetric consumers, it is expedient to use instantaneous conditional capacities  $p_{i_2}, q_{i_2}$  and  $p_{i_0}, q_{i_0}$ , which are essentially the product of instantaneous direct current voltage on the current of the reverse and zero sequence, and to assess the fault of the electricity supply organization, which consists in the ineffective construction of the distribution network — instant conditional capacities  $p_{u_2}, q_{u_2}$  and  $p_{u_0}, q_{u_0}$ , which is essentially a product of instantaneous current of direct sequence on the back and zero sequence voltage. The formation of these values is carried out using the system of  $\alpha, \beta, 0$ -coordinates, which greatly simplifies the construction of measuring devices.*

*In the presence of harmonic distortions, the RMS values of conditional capacities  $p_{i_2}, q_{i_2}$  and  $p_{i_0}, q_{i_0}$  grow and make up from one to ten percent relatively to the main power generated by the voltage and current of the main frequency of the direct sequence. In the case of load asymmetry, the average values of these quantities increase. At the same time an increase  $p_{u_2}, q_{u_2}$  and  $p_{u_0}, q_{u_0}$  testifies to the lack of power of power transformers and the inappropriate use of transformers with the scheme of winding connection "star / star with zero sequence" for powering nonlinear consumers.*

**Keywords:** electrical networks, asymmetric nonsinusoidal mode, distortion source detection.

**Burbelo Mykhailo Yo.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electrical Systems of Power Consumption and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

**Stepura Oleksandr V.** — Head of the ITC "Energy Accounting" Ltd., Vinnitsia

**М. Й. Бурбело<sup>1</sup>**  
**А. В. Степура<sup>2</sup>**

## Оценивание влияния нелинейных несимметричных нагрузок на низковольтные электрические сети

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет;

<sup>2</sup>ООО ІТЦ «Енергоучет», Вінниця

*Проанализирована возможность выявления и оценки влияния источников искажений (несимметрии и высших гармоник) на качество электроэнергии трехфазных сетей с использованием мгновенных условных мощностей обратной и нулевой последовательностей. Такими источниками являются нелинейные потребители, доля*

которых в общей нагрузке с каждым годом растет. Нелинейные потребители потребляют активную мощность на основной частоте и одновременно генерируют в сеть мощность на высших гармониках. Значительной в низковольтных сетях есть также доля потребителей с несимметричной нагрузкой фаз. На основе теории мгновенной мощности выделено мгновенные величины, на основе которых можно сформировать информативные величины, которые позволяют характеризовать влияние нелинейных и несимметричных потребителей на ухудшение качества электроэнергии, а также оценить неэффективность распределительной сети энерго-снабжающей организации.

Для оценки влияния нелинейных и несимметричных потребителей целесообразно использовать мгновенные условные мощности  $p_{i_2}, q_{i_2}$  и  $p_{i_0}, q_{i_0}$ , которые по сути являются произведением мгновенных напряжения прямой последовательности на ток обратной и нулевой последовательности, а для оценки вины электроснабжающей организации, заключающейся в неэффективном построении распределительной сети — мгновенные условные мощности  $p_{u_2}, q_{u_2}$  и  $p_{u_0}, q_{u_0}$ , которые по сути являются произведением мгновенных тока прямой последовательности на напряжение обратной и нулевой последовательности. Формирование этих величин осуществляется с использованием системы  $\alpha, \beta, 0$ -координат, что существенно упрощает построение измерительных устройств.

При наличии гармонических искажений среднеквадратичные значения условных мощностей  $p_{i_2}, q_{i_2}$  и  $p_{i_0}, q_{i_0}$  растут и составляют от одного до десяти процентов относительно основной мощности, создаваемой напряжением и током основной частоты прямой последовательности. В случае несимметрии нагрузок увеличиваются средние значения этих величин. В то же время увеличение  $p_{u_2}, q_{u_2}$  и  $p_{u_0}, q_{u_0}$  свидетельствует о недостаточной мощности силовых трансформаторов и нецелесообразности применения трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда / звезда с нулевым проводом» для питания нелинейных потребителей.

**Ключевые слова:** электрические сети, несимметричные несинусоидальных режимы, выявление источников искажений.

**Бурбело Михаил Иосифович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

**Степура Александр Васильевич** — директор ООО ИТЦ «Энергоучет», Винница