

АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ СПОЖИВАЧІВ, ЯКІ СПОТВОРЮЮТЬ ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, МЕТОДОМ УМОВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ

¹Вінницький національний технічний університет;
²ТОВ ІТЦ «Енергооблік»

На основі аналізу методів виявлення джерел гармонічних спотворень, які використовують інтегральні значення потужностей встановлено, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями. Проаналізовано чутливість виявлення нелінійних споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних потужностей, що оснований на використанні середньоквадратичних значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей. Для оцінювання чутливості пропонується використати відношення середньоквадратичних значень умовних активної та реактивної потужностей зворотної та нульової послідовностей до значення повної потужності гармонічного складника, який є основою для формування струмів відповідних послідовностей. Показано, що чутливість є досить високою для всіх показників. Несиметрія навантажень не знижує чутливості методу. Використання середніх значень умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей дозволяє виявити споживачів, які мають несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями. Збільшення вмісту вищих гармонік сторонніх споживачів (системи) не впливає на чутливість для споживачів з різним характером спотворень. Деяке зменшення чутливості відбувається для споживачів з однаковим характером спотворень споживача і системи, що приводить до накладання гармонічних струмів системи на струми споживача посилюючи або послаблюючи їх. При цьому чутливість залишається високою ($T_{i2} > 1$; $T_{i0} > 1$). Метод забезпечує надійне виявлення споживачів, струм спотворення яких становить не менше 10 % від струму спотворення решти споживачів (системи).

Ключові слова: електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, аналіз чутливості.

Постановка проблеми

Особливої актуальності в останні роки набула проблема виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в низьковольтних електричних мережах. Нелінійні та несиметричні навантаження є джерелами струмів вищих гармонік і струмів трифазних симетричних складових зворотної та нульової послідовностей, які знижують якість електричної енергії, збільшують її втрати.

Розглянемо схему заміщення вузла мережі (рис. 1а). Опір трансформатора визначається з урахуванням того, що струми 4, 7, ..., 2, 5, ... гармонік утворюють відповідно пряму та зворотну послідовність, а струми 3, 6, ... гармонік — нульову послідовність. В опорі трансформатора за необхідності можна врахувати опір лінії прямої та зворотної послідовності.

Відносно будь-якого споживача схему заміщення можна спростити (рис. 1б). Джерело спотворення споживача подано джерелом струму навантаження $J_{(n)n}$, решти споживачів — джерелом системи $J_{(n)c}$. Опори навантаження споживача і системи позначено $Z_{(n)n}$, $Z_{(n)c}$. Опір $Z_{(n)c}$ визначається як результат паралельного увімкнення опору трансформатора і опорів навантаження решти споживачів.

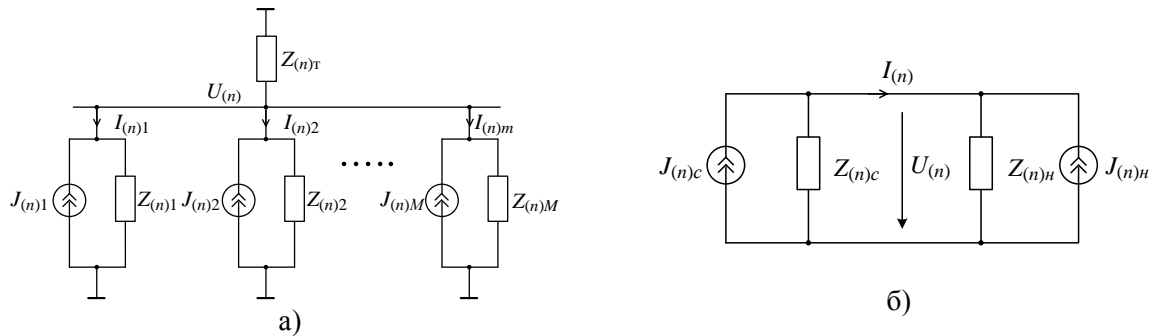


Рис. 1. Повна та спрощена схеми заміщення вузла мережі для n -ї ГС: $\dot{U}_{(n)}$ — комплексна напруга n -ї гармонічної складової (ГС); $\dot{I}_{(n)m}$ — комплексний струм спотворення n -ї ГС для m -го приєднання; $Z_{(n)m}$ — комплексний опір навантаження на n -й ГС для m -го приєднання; $Z_{(n)T}$ — комплексний опір трансформатора на n -й ГС

Напруга n -ї ГС на межі балансової належності дорівнює сумі фактичних внесків системи і навантаження

$$\dot{U}_{(n)} = \dot{U}_{(n)c}^{\Phi B} + \dot{U}_{(n)n}^{\Phi B} = \dot{J}_{(n)c} \frac{Z_{(n)n} Z_{(n)c}}{Z_{(n)n} + Z_{(n)c}} + \dot{J}_{(n)n} \frac{Z_{(n)n} Z_{(n)c}}{Z_{(n)n} + Z_{(n)c}}. \quad (1)$$

Струм n -ї ГС на межі балансової належності дорівнює різниці фактичних внесків системи і навантаження

$$\dot{I}_{(n)} = \dot{I}_{(n)c}^{\Phi B} - \dot{I}_{(n)n}^{\Phi B} = \dot{J}_{(n)c} \frac{Z_{(n)c}}{Z_{(n)n} + Z_{(n)c}} - \dot{J}_{(n)n} \frac{Z_{(n)n}}{Z_{(n)n} + Z_{(n)c}}. \quad (2)$$

Струми n -ї ГС навантаження $\dot{J}_{(n)n}$ і системи $\dot{J}_{(n)c}$ невідомі. Напруга і струм n -ї ГС на межі балансової належності можуть бути вимірні. Опір системи практично визначається опором понижувального трансформатора. Опір навантаження споживачів залежить від потужності навантаження, яка обмежується потужністю трансформатора. Для визначення струмів n -ї ГС навантаження $\dot{J}_{(n)n}$ і системи $\dot{J}_{(n)c}$ можна використати вимірювання напруг $\dot{U}_{(n)}$, струмів $\dot{I}_{(n)}$, активної $P_{(n)}$ та реактивної $Q_{(n)}$ потужностей окремих ГС, однак чутливість таких методів обмежується відношенням $|\dot{J}_{(n)n}| > |\dot{J}_{(n)c}|$. Перспективнішою є група експериментальних методів, основаних на використанні інтегральних потужностей за умов несинусоїдності.

Аналіз останніх досліджень

Авторами [1] пропонується для виявлення нелінійних споживачів використати порівняння реактивної потужності на основній гармоніці, реактивної потужності за С. Фрізе та реактивної потужності за Д. Шароном, відповідно:

$$Q_1 = U_{(1)} I_{(1)} \sin \phi_{(1)}; \quad Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}; \quad Q_S = U \sqrt{\sum_n I_{(n)}^2 \sin^2 \phi_{(n)}}, \quad (3)$$

де S , P , U — повна і активна потужності та середньоквадратична напруга.

Метод базується на тому, що для випадку синусоїдних струму та напруги всі три значення Q_1 , Q_F та Q_S будуть рівні, а для нелінійного навантаження — різними. Причому, Q_1 буде мінімальною, а Q_F буде мати максимальне значення. Реактивна потужність Q_S буде знаходитися між Q_1 та Q_F . Причому, у випадку несинусоїдної напруги та лінійного навантаження, Q_S має значення, яке близьке до Q_1 . В протилежному випадку, коли напруга синусоїдна і навантаження нелінійне, Q_S має значення, близьке до Q_F , через більші спотворення струму, споживаного нелінійним навантаженням. У випадку несинусоїдної напруги та нелінійного навантаження значення Q_S буде мати середнє значення між Q_1 та Q_F .

В [2], [3] запропоновано метод, оснований на потужності спотворення К. Будяну. Як показники наявності спотворення використано потужності спотворення

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}; \quad D_1 = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2} \quad \text{та} \quad D_e = \sqrt{S^2 - P_e^2 - Q_e^2}, \quad (4)$$

де S, P, Q — повна, активна та реактивна потужності у класичному визначенні [4], згідно з яким:

$$P = P_1 + P_H = P_{(1)} + \sum_{n=2}^{\infty} P_{(n)}; \quad Q = Q_1 + Q_H = Q_{(1)} + \sum_{n=2}^{\infty} Q_{(n)}; \quad P_e, Q_e \text{ — активна та реактивна потужнос-}$$

ті у визначенні [4], згідно з яким: $P_e = \sqrt{P_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n^2}; \quad Q_e = \sqrt{Q_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} Q_n^2}.$

В [5] запропоновано метод кількісної оцінки вкладу потужності гармонічних спотворень в уявну потужність S з використанням відношення потужності гармонічних спотворень до повної потужності основної гармоніки

$$HDPR = \frac{D_H}{S_1}; \quad D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} = \sqrt{S_1^2 (THD_U)^2 (THD_I)^2 - P_H^2}, \quad (5)$$

де THD_U, THD_I — сумарні коефіцієнти гармонічних спотворень напруги і струму, і порівняння значення $HDPR$ з пороговим значенням $THR = (THD_{UB})^2$, де THD_{UB} — фонове значення коефіцієнта гармонічних спотворень за напругою для певного вузла мережі. По суті за цим методом порівнюють сумарні коефіцієнти гармонічних спотворень за струмом та напругою. Якщо $THD_I > THD_{UB}$, то споживач є джерелом гармонічних спотворень.

В [6]—[8] запропоновано використовувати значення складників потужностей пульсації

$$n_p = s_p + (p_2 - P_2); \quad n_q = s_q + (q_2 - Q_2), \quad (6)$$

а саме умовні потужності гармонічних спотворень s_p, s_q і умовні потужності зворотної послідовності p_2, q_2 та їх середні значення P_2, Q_2 . Для оцінювання використовують середньоквадратичні значення цих потужностей:

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_p^2(t) dt}; \quad S_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_q^2(t) dt}; \quad (7)$$

$$N_{2p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p_2 - P_2)^2(t) dt}; \quad N_{2q} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_2 - Q_2)^2(t) dt}. \quad (8)$$

Перевагою потужностей спотворень S_p, S_q є те, що вони характеризують окремо гармонічні спотворення миттєвих активної та реактивної потужностей. Водночас, потужності N_{2p}, N_{2q} характеризують несиметрію напруг і струмів за зворотною послідовністю.

Недоліком усіх методів є те, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

В [9] для виявлення та оцінювання гармонічних спотворень запропоновано метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей. Як інформативні параметри для оцінювання гармонічних спотворень споживача використано середньоквадратичні потужності $P_{ски_2}, Q_{ски_2}$ та $P_{ски_0}, Q_{ски_0}$, для визначення яких використовують миттєві потужності, відповідно:

$$p_{i_2} = 0,5(u_{\alpha} - u'_{\beta})(i_{\alpha} + i'_{\beta}), \quad q_{i_2} = 0,5(u'_{\alpha} - u_{\beta})(i_{\alpha} + i'_{\beta}); \quad (9)$$

$$p_{i_0} = i_0 u_{\alpha}, \quad q_{i_0} = -i_0 u_{\beta}, \quad (10)$$

а для оцінювання гармонічних спотворень усіх споживачів (системи) — середньоквадратичні потужності $P_{ски_2}, Q_{ски_2}$ та $P_{ски_0}, Q_{ски_0}$, для визначення яких використовують миттєві потужності, відповідно:

$$p_{u_2} = 0,5(u_{\alpha} + u'_{\beta})(i_{\alpha} - i'_{\beta}), \quad q_{u_2} = 0,5(u'_{\alpha} + u_{\beta})(i_{\alpha} - i'_{\beta}); \quad (11)$$

$$p_{u_0} = -i_\alpha u_0, \quad q_{u_0} = i_\beta u_0. \quad (12)$$

Тут миттєві напруги і струми визначені в системі $\alpha\beta 0$ -координат, а штрихом позначено напруги і струми, які утворюють шляхом їх фазового зсуву на -90 ел. градусів (затримки в часі на чверть періоду) відносно основної гармоніки цих же напруг і струмів. Однак чутливість запропонованого методу не досліджено.

Мета роботи — визначити чутливість виявлення джерел гармонічних спотворень методом умовних потужностей.

Обґрунтування результатів

Розглянемо несинусоїдний симетричний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 1 %, 5 % та 4 % від амплітуди основної гармоніки струмів фаз: $i_f = \sqrt{2}I_f (\sin \omega t + 0,01 \sin 3\omega t \pm 0,05 \sin 5\omega t \mp 0,04 \sin 7\omega t)$, ($f = A, B, C$), що характерно для розподільних мереж за наявності некерованих випрямлячів (переважають канонічні 5, 7, ... гармоніки). Потужність навантаження споживача на основній гармоніці: $\underline{S}_{n1} = 113 + j65$ кВ·А. Потужність навантаження системи (решти споживачів) на основній гармоніці: $\dot{J}_{(n)c} = \pm 2\dot{J}_{(n)n1}$. Навантаження живиться через трансформатор потужністю 400 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем».

В табл. 1 наведено значення умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей за різного співвідношення спотворень системи відносно споживача.

Таблиця 1

Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{n1} за переважання п'ятої та сьомої гармонік (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	$P_{скі_2}$	$Q_{скі_2}$	$P_{скі_0}$	$Q_{скі_0}$	$P_{ски_2}$	$Q_{ски_2}$	$P_{ски_0}$	$Q_{ски_0}$
$\dot{J}_{(n)c} = 0$	6,0	10,2	1,30	1,30	0,7	0,9	0,1	0,1
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	6,2	10,6	1,34	1,34	2,0	2,7	0,2	0,2
$\dot{J}_{(n)c} = -2 \cdot \dot{J}_{(n)n1}$	5,5	9,3	1,20	1,20	2,0	2,7	0,2	0,2

З табл. 1 видно, що значення показників $P_{скі_2}$, $Q_{скі_2}$ є досить великими, що зумовлено істотним вмістом струму зворотної послідовності п'ятої гармоніки контролюваного споживача. Значними є і значення показників $P_{ски_2}$, $Q_{ски_2}$, що зумовлено струмом зворотної послідовності п'ятої гармоніки усіх споживачів. Значення показників $P_{скі_0}$, $Q_{скі_0}$ є помітно меншими, що зумовлено меншим вмістом струму нульової послідовності третьої гармоніки контролюваного споживача.

Для оцінювання чутливості пропонується використати відношення середньоквадратичних значень умовних активної та реактивної потужностей зворотної та нульової послідовностей до значення повної потужності гармоніки, яка є основою для формування струмів відповідних послідовностей. Оскільки основою для формування струму зворотної та нульової послідовності є, відповідно, п'ята та третя гармоніки, то оцінки чутливості показників $P_{скі_2}$, $Q_{скі_2}$, $P_{скі_0}$, $Q_{скі_0}$ для споживача \underline{S}_{n1} будуть

$$T_{Pi2} = \frac{P_{скі_2}}{K_{I(5)}S_{n1}} = \frac{5,5}{0,05 \cdot 130} = 0,85; \quad T_{Qi2} = \frac{Q_{скі_2}}{K_{I(5)}S_{n1}} = \frac{9,3}{0,05 \cdot 130} = 1,43;$$

$$T_{Pi0} = \frac{P_{скі_0}}{K_{I(3)}S_{n1}} = \frac{1,2}{0,01 \cdot 130} = 0,92; \quad T_{Qi0} = \frac{Q_{скі_0}}{K_{I(3)}S_{n1}} = \frac{1,2}{0,01 \cdot 130} = 0,92,$$

де $K_{I(5)}$, $K_{I(3)}$ — коефіцієнти п'ятої та третьої ГС струмів навантаження.

У такому випадку чутливість є достатньо високою для усіх показників. Для зворотної і нульової послідовностей можна ввести еквівалентні показники чутливості $T_{i2} = \sqrt{T_{Pi2}^2 + T_{Qi2}^2}$ та

$T_{i0} = \sqrt{T_{Pi0}^2 + T_{Qi0}^2}$, які характеризують відношення середньоквадратичних значень умовних повних потужностей зворотної та нульової послідовностей до значення повної потужності гармоніки, яка є основою для формування струмів відповідних послідовностей. У цьому випадку $T_{i2} = 1,66$; $T_{i0} = 1,30$.

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого струм навантаження споживача має нелінійне навантаження, що 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: $\underline{S}_{H2} = 123,8 + j46,8$ кВ·А. Навантаження системи залишилося як в попередньому прикладі. В табл. 2 наведено значення інформативних параметрів за нелінійного навантаження системи $\dot{J}_{(n)c} = \pm 2 \dot{J}_{(n)n1}$.

З табл. 2 випливає, що зі зменшенням вмісту п'ятої гармоніки умовні потужності зворотної послідовності P_{cki_2} , Q_{cki_2} істотно зменшуються, а зі збільшенням вмісту третьої гармоніки умовні потужності нульової послідовності P_{cki_0} , Q_{cki_0} істотно збільшуються. Значними є і значення показників P_{cki_0} , Q_{cki_0} , що зумовлено струмом зворотної послідовності п'ятої гармоніки усіх споживачів.

Таблиця 2

Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H2} за більшого вмісту третьої гармоніки (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	P_{cki_2}	Q_{cki_2}	P_{cki_0}	Q_{cki_0}	P_{cki_2}	Q_{cki_2}	P_{cki_0}	Q_{cki_0}
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \dot{J}_{(n)n1}$	2,9	2,6	9,7	9,7	1,3	1,8	0,5	0,5
$\dot{J}_{(n)c} = -2 \dot{J}_{(n)n1}$	2,6	1,7	9,8	9,8	1,3	1,7	0,5	0,5

Оцінимо чутливість показників P_{cki_2} , Q_{cki_2} , P_{cki_0} , Q_{cki_0} :

$$T_{Pi2} = \frac{P_{cki_2}}{K_{I(5)} S_{H2}} = \frac{2,6}{0,02 \cdot 132} = 0,98; \quad T_{Qi2} = \frac{Q_{cki_2}}{K_{I(5)} S_{H2}} = \frac{1,7}{0,02 \cdot 132} = 0,64;$$

$$T_{Pi0} = \frac{P_{cki_0}}{K_{I(3)} S_{H2}} = \frac{9,7}{0,07 \cdot 132} = 1,05; \quad T_{Qi0} = \frac{Q_{cki_0}}{K_{I(3)} S_{H2}} = \frac{9,7}{0,07 \cdot 132} = 1,05.$$

Чутливість показників P_{cki_2} , Q_{cki_2} зменшилась, однак залишається достатньо високою ($T_{i2} = 1,26$). Чутливість показників P_{cki_0} , Q_{cki_0} збільшилась ($T_{i0} = 1,48$).

За несиметричного режиму, наприклад, якщо струм фази С менший на 10 % від значення струмів інших фаз, середньоквадратичні значення практично не змінюються (струмові навіть дещо зростають) (табл. 3) і виникають постійні складові (табл. 4), які характеризують несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями на основній гармоніці. Причому на середні значення не впливає характер гармонічних спотворень системи.

Таблиця 3

Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H2} за більшого вмісту третьої гармоніки і несиметричного несинусоїдного навантаження (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	P_{cki_2}	Q_{cki_2}	P_{cki_0}	Q_{cki_0}	P_{cki_2}	Q_{cki_2}	P_{cki_0}	Q_{cki_0}
$\dot{J}_{(n)c} = 2 \dot{J}_{(n)n1}$	4,6	3,9	10,8	8,9	1,3	1,8	0,5	0,5
$\dot{J}_{(n)c} = -2 \dot{J}_{(n)n1}$	4,3	3,4	11,0	9,1	1,2	1,6	0,5	0,5

Таблиця 4

Середні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{H2} за більшого вмісту третьої гармоніки і несиметричного несинусоїдного навантаження (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	P_{ci_2}	Q_{ci_2}	P_{ci_0}	Q_{ci_0}	P_{ci_2}	Q_{ci_2}	P_{ci_0}	Q_{ci_0}
$\dot{J}_{(n)c} = \pm 2 \dot{J}_{(n)n1}$	3,6	-2,9	0,7	-4,6	0,1	-0,1	0,1	0

Розглянемо можливість збільшення спотворень сторонніх споживачів $\dot{J}_{(n)c} = \pm 10\dot{J}_{(n)n1}$ за того ж навантаження на основній гармоніці $\dot{J}_{(1)c} = \pm 2\dot{J}_{(1)n1}$ для споживача $\underline{S}_{n2} = 123,8 + j46,8$ кВ·А (табл. 5).

Таблиця 5

Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{n2} у разі збільшення вмісту вищих гармонік сторонніх споживачів (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$
$\dot{J}_{(n)c} = 10\dot{J}_{(n)n1}$	4,0	5,1	9,4	9,4	6,8	10,6	1,0	1,0
$\dot{J}_{(n)c} = -10\dot{J}_{(n)n1}$	2,7	2,6	10,1	10,1	5,6	7,4	0,7	0,7

З порівняння результатів, наведених в табл. 5. і табл. 2, видно, що значення усіх показників $P_{ски2}$, $Q_{ски2}$, $P_{ски0}$, $Q_{ски0}$ збільшилася, що можна пояснити різним характером навантажень контрольного споживача відносно решти споживачів.

Розглянемо можливість збільшення спотворень сторонніх споживачів $\dot{J}_{(n)c} = \pm 10\dot{J}_{(n)n1}$ за того ж навантаження на основній гармоніці $\dot{J}_{(1)c} = \pm 2\dot{J}_{(1)n1}$ для споживача $\underline{S}_{n1} = 113 + j65$ кВ·А (табл. 6).

Таблиця 6

Середньоквадратичні значення інформативних параметрів для споживача \underline{S}_{n1} у разі збільшення вмісту вищих гармонік сторонніх споживачів (кВ·А)

$\dot{J}_{(n)c}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$	$P_{ски2}$	$Q_{ски2}$	$P_{ски0}$	$Q_{ски0}$
$\dot{J}_{(n)c} = 10\dot{J}_{(n)n1}$	7,7	13,1	1,6	1,6	7,4	9,8	0,7	0,7
$\dot{J}_{(n)c} = -10\dot{J}_{(n)n1}$	4,1	6,9	1,0	1,0	7,4	9,8	0,7	0,7

Оцінимо чутливість для цього випадку:

$$T_{Pi2} = \frac{P_{ски2}}{K_{I(5)}S_{n1}} = \frac{4,1}{0,05 \cdot 130} = 0,63; \quad T_{Qi2} = \frac{Q_{ски2}}{K_{I(5)}S_{n1}} = \frac{6,9}{0,05 \cdot 130} = 1,06;$$

$$T_{Pi0} = \frac{P_{ски0}}{K_{I(3)}S_{n1}} = \frac{1,0}{0,01 \cdot 130} = 0,77; \quad T_{Qi0} = \frac{Q_{ски0}}{K_{I(3)}S_{n1}} = \frac{1,0}{0,01 \cdot 130} = 0,77.$$

Чутливість усіх показників зменшилась, однак залишається достатньо високою. У даному випадку $T_{i2} = 1,23$; $T_{i0} = 1,09$. Зменшення чутливості пояснюється однаковим характером спотворень споживача і системи, що призводить до накладання гармонічних струмів системи на струми споживача посилюючи або послаблюючи їх.

Таким чином, метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей забезпечує надійне виявлення споживачів, струм спотворення яких складає 10 % і більше від сумарного струму спотворення усіх споживачів (системи) з достатньою чутливістю.

Висновки

Проаналізовано чутливість інформативних параметрів методу умовних потужностей до виявлення джерел гармонічних спотворень в розподільних електричних мережах. Як інформативні параметри для оцінювання гармонічних спотворень споживача використано середньоквадратичні потужності $P_{ски2}$, $Q_{ски2}$ та $P_{ски0}$, $Q_{ски0}$, для визначення яких використовують миттєві потужності. Середні значення цих же величин P_{i2} , Q_{i2} , P_{i0} , Q_{i0} використовують для оцінювання несиметрії струмів на основній частоті за зворотною та нульовою послідовностями. Показано, що метод умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей забезпечує надійне виявлення споживачів, струм спотворення яких складає 10 % від сумарного струму спотворення усіх споживачів (системи).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, «A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, July. pp. 1782-1789, 2007.
- [2] D. Stevanović, and P. Petković, «A single-point method based in distortion power for the detection of harmonic sources in a power system,» *Metrology and Measurement Systems*, vol. XXI, no. 1, pp. 3-14, 2014.
- [3] D. Stevanović, and P. Petković, «A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters,» *Electrical Engineering*, no. 97(2), pp. 165-174, 2015.
- [4] IEEE Std 1459™-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
- [5] R. Lin, L. Xu and X. Zheng, «A Method for Harmonic Sources Detection based on Harmonic Distortion Power Rate,» *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 322, 6 p, 2018.
- [6] M. J. Burbelo, P. Pijarski, V. Zavadskiy, A. Koczorowska-Gazda, L. M. Melnychuk, and Yu. V. Loboda, «Measurement of reactive power under asymmetrical nonsinusoid modes of electric networks with earthed neutral,» *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016*, 100311X (September 28, 2016); Режим доступу: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2564860> .
- [7] М. Й. Бурбело, та А. В. Гадай, «Визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж,» *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, № 24/25, с. 61-67, 2016.
- [8] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, С. М. Мельничук, та Ю. В. Лобода, «Визначення потужностей навантажень трифазних електричних мереж в несинусоїдних та несиметричних режимах,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 1, с. 51-56, 2017.
- [9] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Оцінювання впливу нелінійних несиметричних навантажень на низьковольтні електричні мережі,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 24-30, 2019.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Бурбело Михайло Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет;

Степура Олександр Васильович — директор ТОВ ІТЦ «Енергооблік», Вінниця

M. Yo. Burbelo¹
O. V. Stepura²

Analysis of Sensitivity of Identification of Consumers Which Affect the Quality of Electricity, by Method of Conditional Powers

¹Vinnitsia National Technical University;

²ITC "Energy Accounting" Ltd., Vinnitsia

Based on the analysis of methods for detecting sources of harmonic distortions using integral values of capacities, it is established that they do not allow to distinguish harmonic components that determine the currents of the reciprocal and zero sequences, as well as to detect the asymmetry of loads in reverse and zero sequences. The sensitivity to the detection of nonlinear consumers, which distorts the quality of electric power, by the method of conditional capacities is analyzed, which is based on the use of the mean square values of the conditional capacities of the reciprocal and zero sequences. In order to evaluate the sensitivity, it is proposed to use the ratio of the mean square values of the conditional active and reactive capacities of the reverse and zero sequences to the value of the total power of the harmonic component, which is the basis for forming the currents of the corresponding sequences. It is shown that sensitivity is high enough for all indicators. Load imbalance does not reduce the sensitivity of the method. The use of average values of the conditional capacities of the reverse and zero sequences allows us to identify consumers who have asymmetric loadings in reverse and zero sequence. Increasing the contents of higher harmonics of third-party users (systems) does not affect the sensitivity of consumers with different distortions of the controlled consumer towards the rest of consumers. Some decrease in sensitivity occurs for consumers with the same nature of distortions of the consumer and the system, which leads to overlaying the harmonic currents of the system on the currents of the consumer by amplifying or weakening them. In this case, the sensitivity remains high ($T_{i2} > 1$, $T_{i0} > 1$). The method provides reliable identification of consumers whose current distortion is at least 10 % of the distortion current of the remaining consumers (systems).

Keywords: electrical networks, asymmetric non-sinusoidal modes, sensitivity analysis.

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

Анализ чувствительности выявления потребителей, искажающие качество электроэнергии, методом условных мощностей

¹Винницкий национальный технический университет,
²ООО ИТЦ «Энергоучет», Винница

На основе анализа методов выявления источников гармонических искажений, которые используют интегральные значения мощностей, установлено, что они не позволяют различить гармоничные составляющие, которые обуславливают токи обратной и нулевой последовательностей, а также выявить несимметрию нагрузок по обратной и нулевой последовательности. Проанализированы чувствительность обнаружения нелинейных потребителей, искажающих качество электроэнергии, методом условных мощностей, основанным на использовании среднеквадратических значений условных мощностей обратной и нулевой последовательности. Для оценки чувствительности предлагается использовать отношение среднеквадратических значений условных активной и реактивной мощностей обратной и нулевой последовательности к полной мощности гармонической составляющей, являющейся основой для формирования токов соответствующих последовательностей. Показано, что чувствительность довольно высока для всех показателей. Несимметрия нагрузок не снижает чувствительности метода. Использование средних значений условных мощностей обратной и нулевой последовательности позволяет выявить потребителей, которые имеют несимметрию нагрузок по обратной и нулевой последовательности. Увеличение содержания высших гармоник сторонних потребителей (системы) не влияет на чувствительность в случае потребителей с разным характером искажений. Некоторое снижение чувствительности происходит для потребителей с одинаковым характером искажений потребителя и системы, что приводит к наложению гармонических токов системы на токи потребителя, усиливая или ослабляя их. При этом чувствительность остается высокой ($T_{i2} > 1, T_{i0} > 1$). Метод обеспечивает надежное обнаружение потребителей, ток искажения которых составляет не менее 10 % от тока искажения остальных потребителей (системы).

Ключевые слова: электрические сети, несимметричные несинусоидальные режимы, анализ чувствительности.

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

Степура Александр Васильевич — директор