

УДК 621.317.73

М. Й. Бурбело, к. т. н., доц.

## АНАЛІЗ ПОМИЛОК СИМЕТРУВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА УМОВ НЕСИНУСОЇДНОСТІ

Проаналізовано помилки симетрування навантажень за умов несинусоїдності. Показано, що у разі використання розроблених вимірювальних систем за умов несинусоїдності коефіцієнт зворотної послідовності струму практично не перевищує 0,5 %, якщо напруга живлення, крім основної гармоніки, містить, п'яту та сьому гармоніки, що складають відповідно 10 % та 7 %.

### Алгоритми керування компенсаційними установками симетрування

Як інформативний параметр в компенсаційних установках симетрування навантажень рекомендується [1] використовувати зворотну складову пульсуючої потужності  $\underline{N}_2 = 3\dot{U}_1\dot{I}_2$ , де  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{I}_2$  — комплексні напруга і струм відповідно прямої та зворотної послідовностей трифазного навантаження. Формування вектора керування можна здійснювати у вигляді

$$Q_{BC} = \frac{1}{3}(Q + 2 \operatorname{Im} \underline{N}_2);$$

$$Q_{CA} = \frac{1}{3}(Q - \operatorname{Im} \underline{N}_2 - \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{N}_2);$$

$$Q_{AB} = \frac{1}{3}(Q - \operatorname{Im} \underline{N}_2 + \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{N}_2),$$

де  $Q$  — реактивна потужність трифазного навантаження.

Однак вимірювання складових пульсуючої потужності складне за реалізацією. Тому, під час розробки квазірівноважених вимірювальних систем [2—6] компенсаційних установок симетрування як інформативні параметри використані складові умовної потужності зворотної послідовності  $\underline{S}'_2$  (яка за симетричної системи напруг дорівнює спряженій пульсуючій потужності зворотної послідовності  $\underline{N}_2^*$ )

$$b_{BC} = \frac{1}{3U^2}(Q - 2 \operatorname{Im} \underline{S}'_2);$$

$$b_{CA} = \frac{1}{3U^2}(Q + \operatorname{Im} \underline{S}'_2 - \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{S}'_2);$$

$$b_{AB} = \frac{1}{3U^2}(Q + \operatorname{Im} \underline{S}'_2 + \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{S}'_2),$$

де  $b_{BC}$ ,  $b_{CA}$ ,  $b_{AB}$  — провідності секцій конденсаторних батарей, що забезпечують повну компенсацію реактивної потужності і одночасно симетрування навантажень;  $U$  — діюче значення лінійної напруги мережі.

Ці вирази можуть бути також записані у вигляді

$$b_{BC} = \frac{1}{3}[b_1 - 2b_2];$$

$$b_{CA} = \frac{1}{3}[b_1 + b_2 - \sqrt{3}g_2'];$$

$$b_{AB} = \frac{1}{3}[b_1 + b_2 + \sqrt{3}g_2'],$$

де  $b_1 = Q/U^2$  — реактивна провідність прямої послідовності трифазного навантаження, що дорівнює сумі реактивних провідностей трьох фаз;

$g_2' = \text{Re } \underline{S}_2' / U^2$ ,  $b_2 = \text{Im } \underline{S}_2' / U^2$ , — активна та реактивна умовні провідності зворотної послідовності трифазного навантаження.

Розраховані значення провідностей фаз забезпечують повну компенсацію реактивної потужності та одночасно симетрування навантажень за синусоїдної форми напруг та струмів.

За умов дії несинусоїдних напруг та струмів не існує достатньо обґрунтованого підходу до вибору інформативних провідностей.

Моделювання навантажень за умов несинусоїдності

В [7] введені поняття спектральних опорів та провідностей як інтегральних пасивних параметрів за умов несинусоїдності. Спектральні провідності визначаються за співвідношенням між потужностями та квадратом діючого значення несинусоїдної напруги

$$g_C = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} P_n}{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}; \quad b_C = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} Q_n}{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2};$$

де  $P_n$ ,  $Q_n$  — активна та реактивна потужності  $n$ -ї гармоніки;  $U_n$  — діючі значення струму та напруги  $n$ -ї гармоніки.

Використання спектральних параметрів забезпечує можливість числового аналізу вимірювальних систем за умов несинусоїдності. Проте, як інформативний параметр, спектральна провідність  $b_C$  не забезпечує достатньої точності симетрування основної гармоніки струму та напруги.

В [8, 9] запропоновано розширити коло спектральних пасивних параметрів, що характеризують процеси в електротехнічних об'єктах під час дії періодичних несинусоїдних напруг та струмів, шляхом введення в розгляд параметрів, які забезпечують відповідність частотних і спектральних характеристик та еквівалентність за діючим струмом

$$b_{C(1)} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} Q_n n}{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}; \quad b_{K(1)} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} Q_n / n}{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}; \quad b'_{C(1)} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} Q_n / n}{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 / n^2}.$$

Еквівалентна за діючим струмом провідність  $b_{C(1)}$ , за умов несинусоїдності, є найближчою до комплексної провідності навантаження на частоті основної гармоніки.

Числовий аналіз помилок симетрування

На рис. 1а та 1б зображено залежності коефіцієнта зворотної складової відповідно струму та напруги основної гармоніки як функцій коефіцієнта потужності у разі, якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b_{C(1)}$ .

Тут і нижче розглянуто випадок, коли напруга живлення містить, крім основної гармоніки, п'яту гармоніку, що складає 10 %, та сьому гармоніку, що складає 7 % (згідно з ГОСТ 13109-97 в мережах напругою 10 кВ вміст п'ятої та сьомої гармонік не повинен перевищувати відповідно 4 % та 3 %), а опір лінії електропередачі мережі (10 кВ) становить  $\underline{Z} = 1 + j2$  Ом. Графіки 1 відповідають увімкненню однофазного навантаження, а графіки 2 — двофазного з потужністю фаз 1,1 МВА.

Отже, якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b_{C(1)}$ , то коефіцієнт зворотної послідовності струму основної гармоніки не перевищує 3,5 %, а коефіцієнт зворотної послідовності напруги основної гармоніки не буде перевищувати 0,1 %.

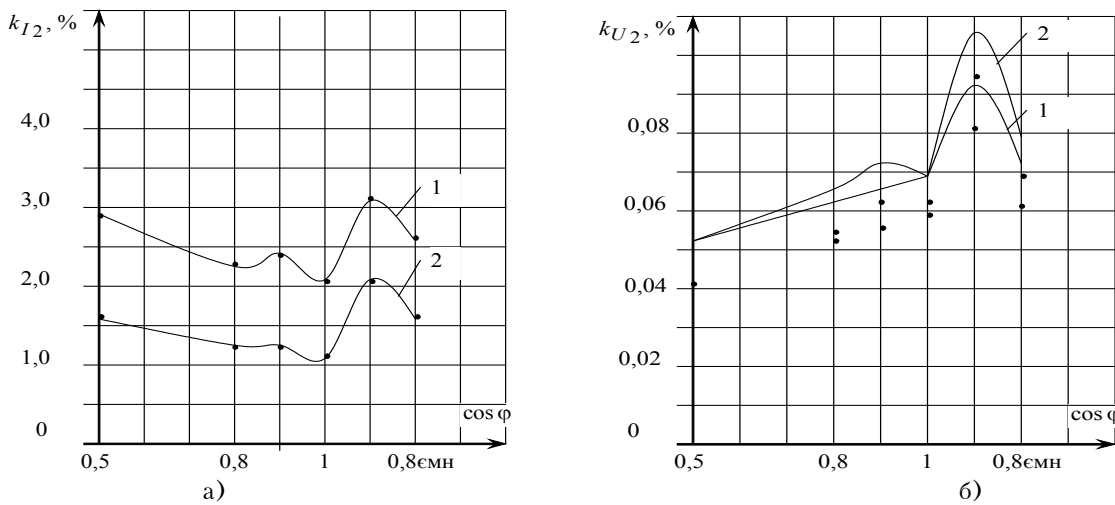


Рис. 1. Графіки залежностей зворотної складової струму (а) та напруги (б), якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b_{C(1)}$

Допустиме значення коефіцієнта зворотної складової напруги згідно з ГОСТ 13109-97 становить 2 %. Таким чином, вказане значення струму зворотної послідовності може бути допустимим і за більшого значення опору лінії живлення. Однак використання спектральної провідності  $b_{C(1)}$  приводить до перекомпенсації реактивної потужності за рахунок високих частот, що є істотним недоліком такого інформативного параметра.

На рис. 2а та 2б зображено залежності коефіцієнта зворотної складової відповідно струму та напруги основної гармоніки як функції коефіцієнта потужності у разі, якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b_{K(1)}$ .

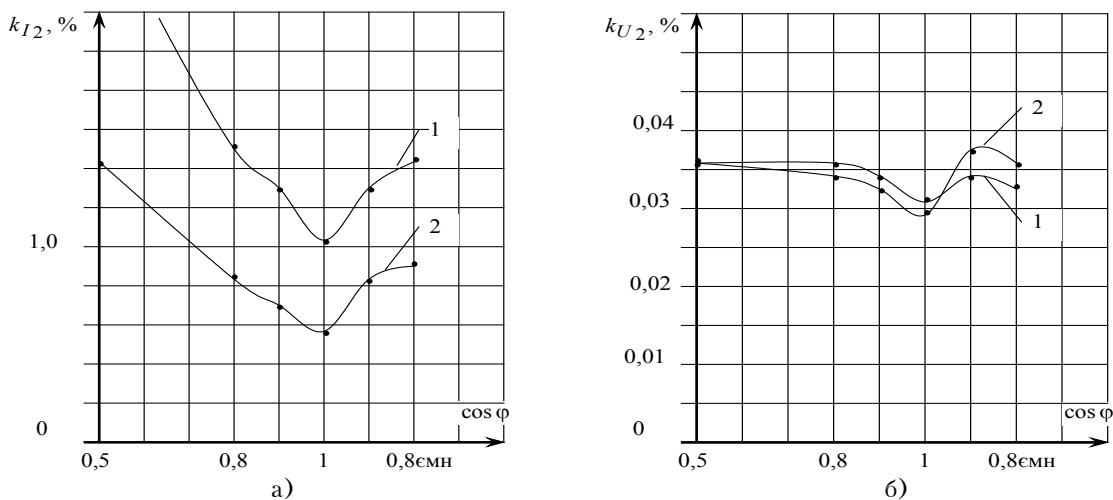


Рис. 2. Графіки залежностей зворотної складової струму (а) та напруги (б), якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b_{K(1)}$

З аналізу наведених графіків випливає, що у разі, якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b_{K(1)}$ , то коефіцієнт зворотної послідовності струму основної гармоніки не перевищує 2,5 %, а коефіцієнт зворотної послідовності напруги основної гармоніки не буде перевищувати 0,04 %.

На рис. 3а та 3б зображено залежності коефіцієнта зворотної складової відповідно струму та напруги основної гармоніки як функції коефіцієнта потужності у разі, якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b'_{C(1)}$ .

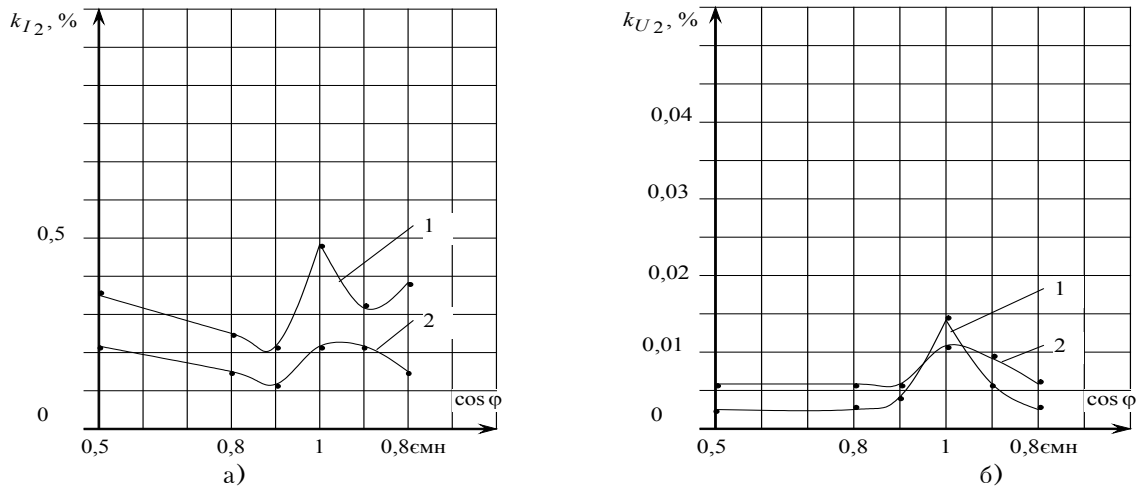


Рис. 3. Графіки залежностей зворотної складової струму (а) та напруги (б), якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b_{C(1)}$

З аналізу наведених графіків випливає, що у разі використання спектральної провідності  $b_{C(1)}$  коефіцієнт зворотної послідовності струму практично не перевищує 0,5 %, а коефіцієнт зворотної послідовності основної гармоніки напруги не буде перевищувати 0,015 %.

Отже, з точки зору компенсації реактивної потужності основної гармоніки за умов несинусоїдності найкращим є використання спектральної провідності  $b_{C(1)}$ . Даний висновок відповідає означенню спектрального параметра  $b_{C(1)}$ , як параметра, що забезпечує найменшу похибку вимірювання комплексної провідності на частоті основної гармоніки.

Таким чином, враховуючи, що згідно з ГОСТ 13109-97 в мережах напругою 10 кВ вміст п'ятої та сьомої гармонік не повинен перевищувати відповідно 4 % та 3 %, можна стверджувати, що квазірівноважені вимірювальні системи забезпечують достатньо високу точність симетрування навантажень за умов несинусоїдності. В порівнянні з наведеними вище значеннями похибок за регламентованого ГОСТ 13109-97 рівня несинусоїдності похибки зменшуються приблизно в шість разів.

Надзвичайно важливим для розробки методики метрологічної атестації є вивчення впливу характеру несиметрії на значення похибок за умов несинусоїдності. На рис. 4а та 4б зображено залежності коефіцієнта зворотної складової струму основної гармоніки як функцій коефіцієнта потужності за різного характеру однофазного та двофазного навантажень у разі, якщо інформативним параметром є спектральна провідність  $b_{C(1)}$ .

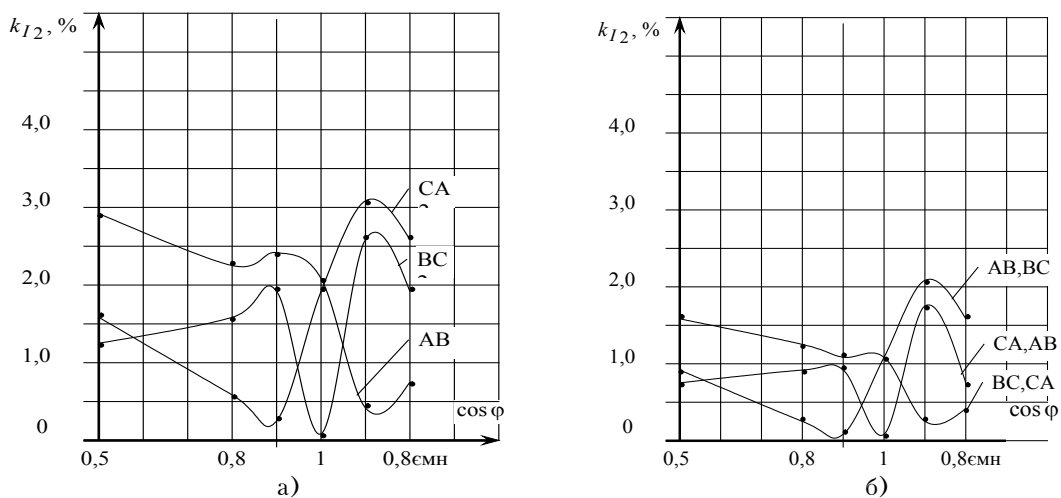


Рис. 4. Графіки залежностей зворотної складової струму за різного характеру однофазного (а) та двофазного (б) навантажень

На основі аналізу графіків встановлено необхідність перевірки вимірювальних систем за різного характеру однофазних та двофазних навантажень.

### Висновки

Проаналізовано похибки симетрування навантажень за умов несинусоїдності. Показано, що з точки зору компенсації реактивної потужності основної гармоніки, за умов несинусоїдності, значно кращим є використання спектральної провідності  $b_{C(1)}$ , за якої коефіцієнт зворотної послідовності струму практично не перевищує 0,5 %, якщо напруга живлення містить, крім основної гармоніки, п'яту та сьому гармоніки, що складають відповідно 10 % та 7 %.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. — К.: Наукова думка, 1985. — 268 с.
2. Квазікомпенсаційні вимірювальні пристрої для регуляторів реактивної потужності / М. Й. Бурбело, Б. С. Рогальський, В. М. Непійвода, С. І. Вознюк // *Енергетика и электрификация*. — 2001. — № 6. — С. 29—33
3. Пат. 64831 Україна. МКИ H02J 3/26 Пристрій для автоматичного симетрування струмів і стабілізації заданого коефіцієнта потужності трифазної системи / М. Й. Бурбело, Б. С. Рогальський, В. О. Іванков, В. Ф. Сайченко (Україна). — № 2001075285; Заявлено 24.07.01. Опубл. 15.03.04. Бюл. № 3.
4. Бурбело М. Й. Квазікомпенсаційні вимірювальні перетворювачі для пристроїв симетрування трифазних навантажень // *Енергетика и электрификация*. — 2001. — № 12. — С. 26—28.
5. Бурбело М. Й., Бірюков О. О., Бабенко О. В. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. — 2002. — № 2.— С. 92—95.
6. Бурбело М., Бабенко О. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування швидкозмінних навантажень трифазних споживачів // *Промислова електроенергетика та електротехніка*. — 2003. — № 5. — С. 25—27.
7. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) / Под ред. К. Б. Карандеева. — Новосибирск: Наука, 1972. — 164 с.
8. Бурбело М. Й. Диференціація параметрів спектральних опорів та компенсаційно-мостові кола для їх вимірювання // *Технічна електродинаміка*. — 2001. — №6. — С. 69—71.
9. Бурбело М. Й., Кравець О. М. Вимірювання еквівалентних параметрів електричних кіл за умови дії періодичних несинусоїдних струмів // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. — 2002. — № 3. — С. 59—62.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження

Надійшла до редакції 27.12.04.  
Рекомендована до друку 16.02.05.

**Бурбело Михайло Йосипович** — доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження.

Вінницький національний технічний університет