

М. Й. Бурбело, д-р. техн. наук, проф.;  
С. М. Мельничук;  
М. В. Никитенко

## ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ПАРАМЕТРІВ НЕ-СИМЕТРИЧНИХ ШВИДКОЗМІННИХ ТРИФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розроблено структурну схему вимірювального перетворювача параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень та проаналізовано його метрологічні характеристики.

### Вступ та постановка завдання

В сучасних мережах промислових підприємств і енергопостачальних компаній виникають несиметричні режими. Проведені експериментальні дослідження свідчать, що показники, якими нормується несиметрія напруги згідно з ГОСТ 130109-97, в деяких випадках виходять за нормовані та гранично допустимі межі. Через те, що параметри несиметрії напруги змінюються в часі, постає задача керування несиметрією режиму в реальному часі. Для такого керування доцільно використовувати керовані симетрувальні пристрої на базі батарей статичних компенсаторів (СТК) реактивної потужності, які одночасно дозволяють здійснювати компенсацію реактивних навантажень.

Застосування СТК в електричних мережах промислових підприємств і енергопостачальних організацій забезпечує одночасну оптимізацію багатьох параметрів якості електроенергії (відхилення, коливання, несиметрії та несинусоїдності напруги), та вимагає досконалого інформаційного забезпечення. Для систем динамічної компенсації реактивної потужності час запізнення системи керування не повинен перевищувати половину періоду напруги живлення [1], що вимагає створення швидкодіючих вимірювальних перетворювачів. В [2] розроблено вимірювальні перетворювачі для систем динамічної компенсації реактивної потужності, в яких запропоновано підхід, що використовує ортогональні миттєві потужності. Визначення поточних значень активної та реактивної потужності здійснюється інтегруванням на ковзному інтервалі часу протягом половини періоду напруги живлення добутоків напруг і струмів, поданих в ортогональній системі координат. Цікава можливість створення швидкодіючих вимірювальних перетворювачів параметрів несиметрії навантажень, призначених для застосування в СТК.

Несиметричні навантаження зручно характеризувати комплексною умовною потужністю

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{21} + \underline{S}_{12} = 3\dot{U}_2^* I_1 + 3\dot{U}_1^* I_2,$$

перша складова якої характеризує потужність спотворення, зумовлену несиметрією напруги джерела живлення, а друга — несиметрією струму навантаження. Метою статті є розроблення структурної схеми та аналізу метрологічних характеристик вимірювального перетворювача параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень.

### Обґрунтування результатів

Запропоновано структурну схему вимірювального перетворювача потужності  $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$  (рис. 1), який складається з трансформатора напруги ТН, трансформаторів струму ТС, перетворювача напруг ПН, перетворювача струмів в напруги ПС, трьох інтеграторів

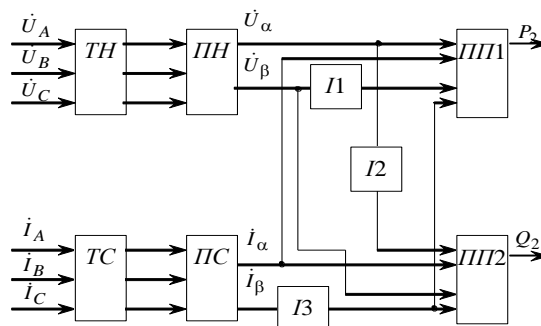


Рис. 1. Структурна схема вимірювального перетворювача  $P_2, Q_2$

рів  $I_1, I_2, I_3$ , які забезпечують інтегрування напруг  $u_\beta(\omega t)$  та  $u_\alpha(\omega t)$ , а також струму  $i_\beta(\omega t)$ , двох перетворювачів потужності ПП1, ПП2.

За допомогою перетворювачів напруги ПН та струму ПС формуються сигнали, які пропорційні ортогональним напругам та струмам:

$$u_\alpha(t) = \frac{1}{3}(u_{AB}(t) - u_{CA}(t)); u_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}u_{BC}(t); i_\alpha(t) = i_A(t); i_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_B(t) - i_C(t)).$$

З використанням напруг і струмів в ортогональній системі координат, а також напруг, зсунутих з використанням інтеграторів на  $-90$  електричних градусів перетворювачами потужності ПП1, ПП2 формуються сигнали, що пропорційні інтегральним виразам активної  $P_2(t)$  та реактивної  $Q_2(t)$  умовних потужностей зворотної послідовності. Формування цих величин здійснюється на ковзному інтервалі часу тривалістю половини періоду напруги живлення.

Метод отримання інформації про активну та реактивну потужності оснований на використанні ортогональних миттєвих потужностей. Отримання поточних значень активної та реактивної потужності здійснюється на ковзному інтервалі часу тривалістю половини періоду ( $T/2$ ) із застосуванням ортогональної системи координат. Інформативні параметри  $P_2, Q_2$  визначаються з формули

$$P_2(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha i_\alpha - u'_\beta i'_\beta) dt; Q_2(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u'_\alpha i_\alpha + u_\beta i'_\beta) dt,$$

де  $u'_\alpha, u'_\beta, i'_\beta$  — перетворення Гільберта ортогональних складових напруги та складової струму;  $T$  — період напруги живлення.

Для інтеграторів характерні фазові похибки, а також похибки, що зумовлені несинусоїдністю струмів та напруг. У разі зсуву на кут  $\pi/2$  можливим є запізнення моментів початку та кінця інтегрування. Функція перетворення з урахуванням можливих джерел похибок за виключенням похибки, що зумовлена невідповідністю інтервалу інтегрування тривалості пів періоду напруги живлення, має такий вигляд:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t [S_\alpha \sin(\omega t) \sin(\omega t - \phi_\alpha) - S_\beta \sin(\omega t + \psi_\beta) \sin(\omega t - \phi_\beta)] dt = \\ &= \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t [S_\alpha \cos \phi_\alpha - S_\alpha \cos(2\omega t - \phi_\alpha) - S_\beta \cos(\psi_\beta + \phi_\beta) + S_\beta \cos(2\omega t + \psi_\beta - \phi_\beta)] dt = \quad (1) \\ &= \frac{3}{2} [S_\alpha \cos \phi_\alpha - S_\beta \cos(\psi_\beta + \phi_\beta)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t [S_\alpha \sin(\omega t + \psi_\alpha) \sin(\omega t - \phi_\alpha) - S_\beta \sin(\omega t) \sin(\omega t - \phi_\beta)] dt = \\ &= \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t [S_\alpha \cos(2\omega t - \phi_\alpha + \psi_\alpha) - S_\alpha \cos(\phi_\alpha + \psi_\alpha) - S_\beta \cos \phi_\beta + S_\beta \cos(2\omega t - \phi_\beta)] dt = \quad (2) \\ &= -\frac{3}{2} [S_\alpha \cos(\phi_\alpha + \psi_\alpha) + S_\beta \cos \phi_\beta], \end{aligned}$$

де  $S_\alpha, S_\beta$  — повні потужності ортогональних складових з урахуванням амплітудних похибок вхідних перетворювачів  $S_\alpha = (1 + \alpha)U_\alpha I_\alpha$ ,  $S_\beta = (1 + \beta)U_\beta I_\beta$ , тут  $\alpha, \beta$  — відносні похибки вхідних перетворювачів;  $\phi_\alpha, \phi_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta$  — фазові похибки перетворення складових відповідно струму і напруги;  $T$  — період напруги живлення.

Для аналізу похибки, що зумовлена невідповідністю інтервалу інтегрування тривалості половини періоду напруги живлення, формули (1), (2) зводяться до вигляду

$$P_2 = \frac{3}{T} \left[ \begin{aligned} & \frac{T}{2} [S_\alpha \cos \phi_\alpha - S_\beta \cos(\psi_\beta + \phi_\beta)] - \\ & -S_\alpha \frac{1}{2\omega} [\sin(2\omega t - \phi_\alpha) - \sin(2\omega(t - T/2) - \phi_\alpha)] + \\ & +S_\beta \frac{1}{2\omega} [\sin(2\omega t + \psi_\beta - \phi_\beta) - \sin(2\omega(t - T/2) + \psi_\beta - \phi_\beta)] \end{aligned} \right]; \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{3}{T} \left[ \begin{aligned} & -\frac{T}{2} [S_\alpha \cos(\phi_\alpha + \psi_\alpha) + S_\beta \cos(\phi_\beta)] + \\ & +S_\alpha \frac{1}{2\omega} [\sin(2\omega t - \phi_\alpha + \psi_\alpha) - \sin(2\omega(t - T/2) - \phi_\alpha + \psi_\alpha)] + \\ & +S_\beta \frac{1}{2\omega} [\sin(2\omega t - \phi_\beta) - \sin(2\omega(t - T/2) - \phi_\beta)] \end{aligned} \right]. \quad (4)$$

Проаналізуємо вплив складових функцій перетворення на результат вимірювання. Представимо ці функції у вигляді частинних похідних

$$P_2 = \frac{\partial P_2}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial P_2}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial P_2}{\partial \phi_\alpha} \Delta \phi_\alpha + \frac{\partial P_2}{\partial \phi_\beta} \Delta \phi_\beta + \frac{\partial P_2}{\partial \psi_\alpha} \Delta \psi_\alpha + \frac{\partial P_2}{\partial \psi_\beta} \Delta \psi_\beta; \quad (5)$$

$$Q_2 = \frac{\partial Q_2}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial Q_2}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial Q_2}{\partial \phi_\alpha} \Delta \phi_\alpha + \frac{\partial Q_2}{\partial \phi_\beta} \Delta \phi_\beta + \frac{\partial Q_2}{\partial \psi_\alpha} \Delta \psi_\alpha + \frac{\partial Q_2}{\partial \psi_\beta} \Delta \psi_\beta. \quad (6)$$

Визначимо коефіцієнти впливу з формул (1), (2)

$$\frac{\partial P_2}{\partial \alpha} = 1,5S_\alpha \cos \phi_\alpha; \quad \frac{\partial P_2}{\partial \beta} = -1,5S_\beta \cos(\psi_\beta + \phi_\beta); \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \phi_\alpha} = -1,5S_\alpha \sin \phi_\alpha; \quad \frac{\partial P_2}{\partial \phi_\beta} = 1,5S_\beta \sin(\psi_\beta + \phi_\beta); \quad \frac{\partial P_2}{\partial \psi_\beta} = 1,5S_\beta \sin(\psi_\beta + \phi_\beta); \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \alpha} = -1,5S_\alpha \cos(\phi_\alpha + \psi_\alpha); \quad \frac{\partial Q_2}{\partial \beta} = -1,5S_\beta \cos \phi_\beta; \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \phi_\alpha} = 1,5S_\alpha \sin(\phi_\alpha + \psi_\alpha); \quad \frac{\partial Q_2}{\partial \psi_\alpha} = 1,5S_\alpha \sin(\psi_\alpha + \phi_\alpha); \quad \frac{\partial Q_2}{\partial \phi_\beta} = 1,5S_\beta \sin \phi_\beta. \quad (10)$$

де  $S_\alpha, S_\beta$  — повні потужності ортогональних складових без урахування амплітудних похибок вхідних перетворювачів  $S_\alpha = U_\alpha I_\alpha$ ,  $S_\beta = U_\beta I_\beta$ .

Враховуючи, що  $\cos \phi$  для малих кутів дорівнює одиниці, а  $\sin \phi$  — нулю, то впливовими на значення похибок є коефіцієнти (7) та (9). Коефіцієнтами (8) та (10) можна знехтувати. Отже, на результат вимірювання істотно впливають амплітудні похибки вхідних перетворювачів вимірювальних каналів.

На рис. 2, 3 показано графіки абсолютних похибок вимірювання  $P$ ,  $Q$  та  $P_2$ ,  $Q_2$  в залежності від зміни амплітудної похибки вимірювальних трансформаторів напруги та струму. Моделювання проводилося за умови зміни напруги  $\pm 1\%$  від дійсного значення (рис. 2) та кута вимірювального трансформатора в межах одного градуса (рис. 3).

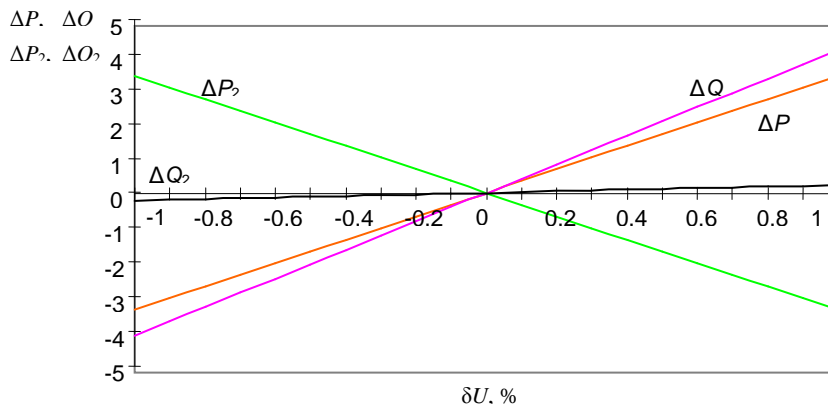


Рис. 2. Вплив амплітудних похибок вимірювальних трансформаторів

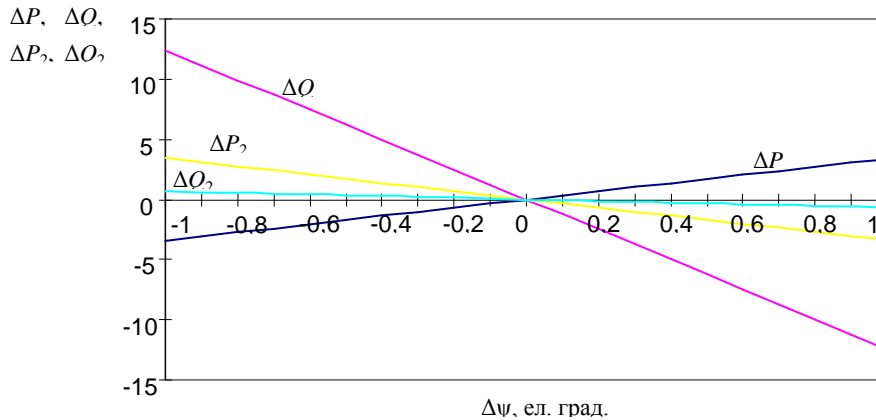


Рис. 3. Вплив фазових похибок вимірювальних трансформаторів

З наведених графіків випливає, що абсолютні похибки вимірювання несиметричних складових потужностей не перевищують похибок визначення симетричних складових потужностей.

### Висновки

Проаналізовано похибки вимірювального перетворювача параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень. Показано, що найвпливовішими є похибки вхідних вимірювальних перетворювачів. Однак вплив цих похибок на результати вимірювання несиметричних складових потужностей можна зменшити завдяки використанню високоточних вхідних вимірювальних перетворювачів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Варецький Ю. О. Режимы электрических сетей и систем электроснабжения с статическими тиристорными компенсаторами (методология анализа) : дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук / Ю. О. Варецький. — Л., 1999. — 301 с.
2. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, А. В. Гадай // Енергетика та електрифікація. — 2008. — № 11. — С. 42—45.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 11.03.11  
Рекомендована до опублікування 11.04.11

**Бурбело Михайло Йосипович** – професор, **Мельничук Сергій Миколайович** — аспірант,  
**Никитенко Максим Васильович** — аспірант.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця