

УДК 621.317.789

А.А. Щерба, Д.К. Маков

АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЧІВ НЕСИМЕТРІЇ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ

This article is devoted to the increase of exactness of measuring three-phase indexes of quality of electric power in the systems of three-phase power supply. We analyze transformation equations of three-phase voltage of six-pole is in-process executed with three by an entrance and by three output clamps. We show that four complex coefficients fully characterizing this six-pole can be entered. These are transmitivities for positive-sequence voltage (PSV) as well as of reverse sequence voltage (RSV) of fundamental frequency traditional for an electric signal theory and additional two coefficients of transformation changing PSV and RSV to RSV and PSV of fundamental frequency, accordingly. These coefficients of transformation characterize the variation degree of parameters of six-pole elements. Using this approach, transformation equations of three-phase entry block of digital measuring device of quality indexes of electric power are studied when three-phase voltage is supplied to its entrances and the coefficient of asymmetry on the reverse sequence of fundamental frequency is measured. Each of three channels of three-phase entry block contains the chart of galvanic upshot, chart of down-scaling, filter of lower frequencies. We analyze additive and multiplicative errors of three-phase entry block is executed, the dominant error of measuring. When this dominant error (that fully feasibly) is corrected, the total error of measuring the asymmetry coefficient will be significantly decreased.

Вступ

Невідповідність показників якості електроенергії міжнародним стандартам (з 01.01.2000 р. введений у дію в Україні міжнародний Держстандарт 13109–97) призводить до значних економічних втрат. Більшість електроенергії споживається трифазними користувачами. Тому в цій статті розглянуті особливості рівнянь перетворення вимірювачів трифазних показників якості електроенергії. Перевагу слід віддати тільки аналого-цифровим вимірювачам [1–3], які використовують математичну обробку кодів миттєвих значень фазних (міжфазних) напруг мережі електропостачання і придатні для вимірювання динамічних і статичних показників якості. Серед трифазних статичних показників якості електроенергії найбільш складними для вимірювання є коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю, який характеризується напругою зворотної послідовності (НЗП) основної частоти, та коефіцієнт викривлення синусоїдності. Утримати ці показники в межах норми при збільшенні несиметричного і нелінійного навантаження в електричних мережах все складніше. Використання сучасних мікроконтролерів дає можливість розробляти і використовувати нові цифрові алгоритми вимірювання статичних і динамічних показників якості електроенергії з коригуванням домінуючих похибок, реалізувати ці алгоритми в невеликих за розміром і дешевих пристроях. Потреба в таких пристроях дуже велика. Кожен користувач, особливо трифазний, повинен мати мож-

ливість контролювати якість спожитої ним електричної енергії і залежно від якості електроенергії сплачувати за різними тарифами за спожиту електроенергію.

Вимоги до точності і швидкодії засобів вимірювання показників якості електроенергії високі. Так, при вимірюванні коефіцієнта несиметрії для виділення НЗП 4,4 В з абсолютною похибкою 0,4 В вимога до розкиду параметрів вхідного трифазного блока по основній частоті і подальшого перетворення в кожному з трьох каналів фазної (міжфазної) напруги досить жорстка – не більше ~ 0,1 %.

Інші трифазні показники якості (відповідно статичний і динамічний) – відхилення і коливання напруги, характеризуються напругою прямої послідовності (НПП) основної частоти. НПП і НЗП – це трифазні напруги. Ці трифазні напруги підключаються до вхідного складеного трифазного блока, виходи якого підключаються до наступних трифазних блоків. Тому для підвищення точності вимірювання трифазних показників якості електроенергії необхідно виконати аналіз рівнянь перетворення трифазної напруги лінійними шестиполіусниками з трьома входами і трьома виходами.

Постановка задачі

Мета статті – виконати аналіз рівнянь перетворення трифазної напруги лінійними шестиполіусниками з трьома входами і трьома виходами для виявлення домінуючих похибок і подальшого розроблення рекомендацій щодо

коригування цих похибок для зменшення результуючої похибки вимірювання НЗП для трифазних користувачів електроенергії.

Розв'язок поставленої задачі

При аналізі [4] рівняння перетворення трифазної напруги основної частоти лінійним шестиполіусником з трьома входами А, В, С і трьома виходами а, b, c використовуємо підхід, розроблений для фільтрів симетричних складових [5]. Припустимо, що на три входи А, В, С

шестиполіусника подається НПП $\dot{U}_{1(i)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ з

основною частотою ω_m , $a = \exp(j2\pi/3)$. Також припустимо, що шестиполіусник (рис. 1) має симетричну відносно входів А, В, С і виходів а, b, c схему з ланками, параметри елементів яких дорівнюють розрахунковим значенням для основної частоти ω_p .

Введемо $\dot{\alpha}$ – коефіцієнт передачі шестиполіусника для симетричної системи НПП як відношення однієї з вихідних міжфазних (фазних) напруг симетричної системи НПП до однієї з вхідних міжфазних (фазних) напруг симетричної системи НПП основної частоти:

$$\dot{\alpha} = \dot{U}_{ab+} / \dot{U}_{1(i)}.$$

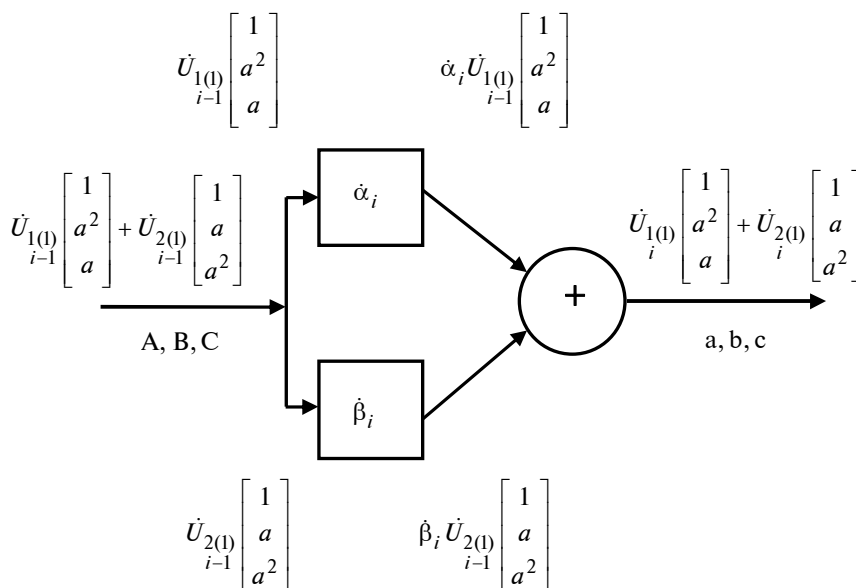


Рис. 1. Графічна схема перетворення трифазної напруги в *i*-му лінійному симетричному шестиполіуснику

На виходах шестиполіусника трифазна напруга дорівнює

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix} = \dot{U}_{ab+} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$$

і являє собою НПП внаслідок симетричності джерела трифазної напруги і навантаження – шестиполіусника. Це твердження дійсне як при $\omega_m = \omega_p$, так і при $\omega_m \neq \omega_p$.

Введемо $\dot{\beta}$ – коефіцієнт передачі шестиполіусника для НЗП $\dot{U}_{2(i)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ основної частоти

як відношення однієї з вихідних міжфазних (фазних) напруг симетричної системи НЗП основної частоти до однієї з вхідних міжфазних (фазних) напруг симетричної системи НЗП основної частоти:

$$\dot{\beta} = \dot{U}_{ab-} / \dot{U}_{2(i)}.$$

На виходах а, b, c шестиполіусника три-

фазна напруга дорівнює $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} \\ \dot{U}_{bc-} \\ \dot{U}_{ca-} \end{pmatrix} = \dot{U}_{ab-} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ і

являє собою НЗП внаслідок симетричності джерела трифазної напруги і навантаження – шестиполіусника. Це твердження також дійсне як при $\omega_m = \omega_p$, так і при $\omega_m \neq \omega_p$.

Якщо вхідний трифазний блок вимірювачів коефіцієнта по напрузі зворотної послідовності (КНЗ) основної частоти має коефіцієнти передачі по кожній фазній (міжфазній) напрузі, що не відповідають розрахунковим значенням (з розкидом у різних напрямках), то при подачі на його входи НПП на виходах вона буде сприйматись як трифазна напруга, в якій є НЗП. Ця уявна несиметрія є векторною похибкою від розкиду параметрів вхідного трифазного блока, яка спотворює результати вимірювань КНЗ і збільшується при збільшенні цього розкиду.

У загальному випадку до входів А, В, С вхідного трифазного блока підключається несиметрична трифазна напруга $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab} \\ \dot{U}_{bc} \\ \dot{U}_{ca} \end{pmatrix}$,

яку можна подати у вигляді суми симетричних систем НПП – $\dot{U}_{ab+} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ і НЗП – $\dot{U}_{ab-} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ основної

частоти. Використовуючи принцип накладання в зв'язку з лінійністю схеми вираз для напруги на виходах шестиполюсника можна записати у такому вигляді:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab} \\ \dot{U}_{bc} \\ \dot{U}_{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} \\ \dot{U}_{bc-} \\ \dot{U}_{ca-} \end{pmatrix} = \alpha \dot{U}_{1(l)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \beta \dot{U}_{2(l)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}.$$

За наявності розкиду в різні напрямки параметрів кожного каналу шестиполюсника має місце розкид коефіцієнтів передачі для вхідних міжфазних (фазних) напруг $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$. В цьому випадку (рис. 2) при підключенні симетричної системи НПП $\dot{U}_{1(l)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ на три входи

(затискачі А, В, С) шестиполюсника напруга на його виходах а, b, c буде несиметричною, тобто $|\dot{U}_{ab+}| \neq |\dot{U}_{bc+}| \neq |\dot{U}_{ca+}| \neq |\dot{U}_{ab+}|$. Причому ступінь несиметричності вихідної трифазної напруги шестиполюсника визначається ступенем розкиду в різні напрямки параметрів цього шести-

полюсника. Несиметричну трифазну напругу

$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix}$ на виходах а, b, c шестиполюсника від

дії $\dot{U}_{1(l)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ можна розкласти на дві симетричні

складові – НПП $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab++} \\ \dot{U}_{bc++} \\ \dot{U}_{ca++} \end{pmatrix}$ і НЗП $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+-} \\ \dot{U}_{bc+-} \\ \dot{U}_{ca+-} \end{pmatrix}$ основ-

ної частоти:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab++} \\ \dot{U}_{bc++} \\ \dot{U}_{ca++} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+-} \\ \dot{U}_{bc+-} \\ \dot{U}_{ca+-} \end{pmatrix} =$$

$$= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} + a\dot{U}_{bc+} + a^2\dot{U}_{ca+} \\ (\dot{U}_{ab+} + a\dot{U}_{bc+} + a^2\dot{U}_{ca+})a^2 \\ (\dot{U}_{ab+} + a\dot{U}_{bc+} + a^2\dot{U}_{ca+})a \end{pmatrix} +$$

$$+ \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} + a^2\dot{U}_{bc+} + a\dot{U}_{ca+} \\ (\dot{U}_{ab+} + a^2\dot{U}_{bc+} + a\dot{U}_{ca+})a \\ (\dot{U}_{ab+} + a^2\dot{U}_{bc+} + a\dot{U}_{ca+})a^2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Трифазна напруга $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+-} \\ \dot{U}_{bc+-} \\ \dot{U}_{ca+-} \end{pmatrix} = \dot{U}_{ab+-} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ яв-

ляє собою симетричну складову протилежної послідовності (НЗП) порівняно з вхідною симетричною послідовністю (НПП).

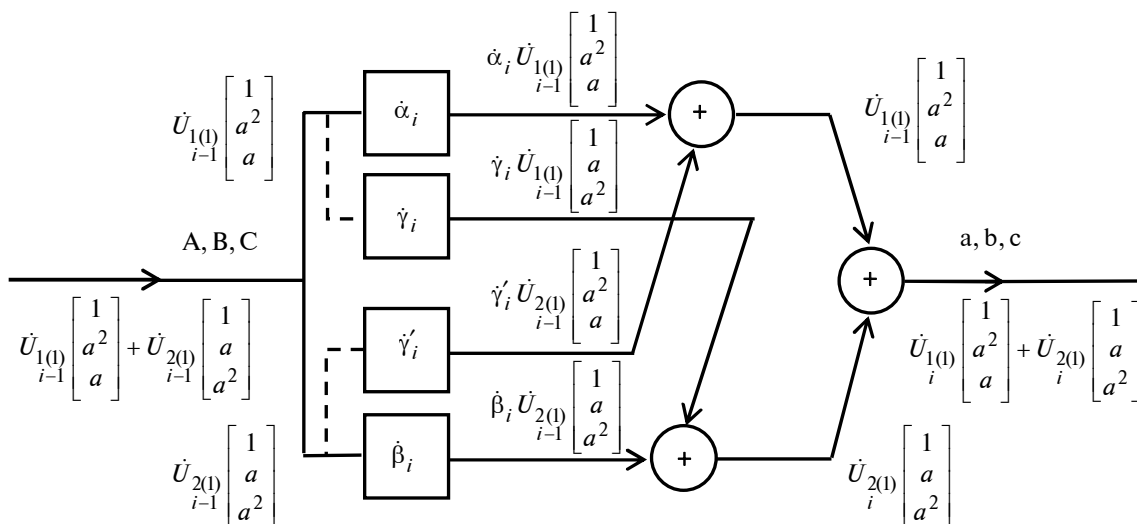


Рис. 2. Графічна схема перетворення трифазної напруги в i -му лінійному несиметричному шестиполюснику

Тоді для шестиполюсника введемо коефіцієнти $\dot{\alpha}$ і $\dot{\gamma}$ для НПП основної частоти:

$$\begin{aligned}\dot{\alpha} &= (\dot{U}_{ab+} + a\dot{U}_{bc+} + a^2\dot{U}_{ca+})/3\dot{U}_+, \\ \dot{\gamma} &= (\dot{U}_{ab+} + a^2\dot{U}_{bc+} + a\dot{U}_{ca+})/3\dot{U}_+, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\dot{\alpha}$ – коефіцієнт передачі шестиполюсника НПП $\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$, $\dot{\gamma}$ – коефіцієнт перетворення

шестиполюсником НПП $\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ на НЗП.

Коефіцієнт $\dot{\gamma}$ характеризує ступінь розкиду в різні напрямки параметрів шестиполюсника і показує ступінь спотворення шестиполюсником НПП.

З урахуванням (2) вираз (1) набуде такого вигляду:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\alpha}\dot{U}_+ \\ \dot{\alpha}a^2\dot{U}_+ \\ \dot{\alpha}a\dot{U}_+ \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\gamma}\dot{U}_+ \\ \dot{\gamma}a\dot{U}_+ \\ \dot{\gamma}a^2\dot{U}_+ \end{pmatrix} = \dot{\alpha}\dot{U}_+ \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \dot{\gamma}\dot{U}_+ \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}.$$

При підключенні симетричної системи

НЗП $\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ основної частоти на три входи

(затискачі А, В, С) цього шестиполюсника з розкидом у різні напрямки параметрів напруга на його виходах а, b, c буде також несиметричною, тобто $|\dot{U}_{ab-}| \neq |\dot{U}_{bc-}| \neq |\dot{U}_{ca-}| \neq |\dot{U}_{ab-}|$.

Причому ступінь несиметричності вихідної трифазної напруги шестиполюсника також визначається ступенем розкиду параметрів цього шестиполюсника. Несиметричну трифазну на-

пругу $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} \\ \dot{U}_{bc-} \\ \dot{U}_{ca-} \end{pmatrix}$ на виходах а, b, c шестиполюс-

ника від дії $\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ можна розкласти на дві

симетричні складові – НПП $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix}$ і НЗП

$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab--} \\ \dot{U}_{bc--} \\ \dot{U}_{ca--} \end{pmatrix}$ основної частоти:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} \\ \dot{U}_{bc-} \\ \dot{U}_{ca-} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab--} \\ \dot{U}_{bc--} \\ \dot{U}_{ca--} \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} + a\dot{U}_{bc-} + a^2\dot{U}_{ca-} \\ (\dot{U}_{ab-} + a\dot{U}_{bc-} + a^2\dot{U}_{ca-})a^2 \\ (\dot{U}_{ab-} + a\dot{U}_{bc-} + a^2\dot{U}_{ca-})a \end{pmatrix} + \\ &+ \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} + a^2\dot{U}_{bc-} + a\dot{U}_{ca-} \\ (\dot{U}_{ab-} + a^2\dot{U}_{bc-} + a\dot{U}_{ca-})a \\ (\dot{U}_{ab-} + a^2\dot{U}_{bc-} + a\dot{U}_{ca-})a^2 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Трифазна напруга $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix} = \dot{U}_{ab+} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ яв-

ляє собою симетричну складову основної частоти протилежної послідовності (НПП) порівняно з вхідною симетричною послідовністю (НЗП).

Для шестиполюсника введемо також коефіцієнти $\dot{\beta}$ і $\dot{\gamma}'$ для НЗП основної частоти:

$$\begin{aligned}\dot{\beta} &= (\dot{U}_{ab-} + a^2\dot{U}_{bc-} + a\dot{U}_{ca-})/3\dot{U}_-, \\ \dot{\gamma}' &= (\dot{U}_{ab-} + a\dot{U}_{bc-} + a^2\dot{U}_{ca-})/3\dot{U}_-, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\dot{\beta}$ – коефіцієнт передачі шестиполюсником

НЗП $\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ основної частоти, $\dot{\gamma}'$ – коефі-

цієнт перетворення НЗП $\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ на НПП,

який характеризує розкид параметрів шестиполюсника і показує ступінь спотворення шестиполюсником НЗП основної частоти.

З урахуванням (4) вираз (3) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} \\ \dot{U}_{bc-} \\ \dot{U}_{ca-} \end{pmatrix} &= \\ &= \begin{pmatrix} \dot{\beta}\dot{U}_- \\ \dot{\beta}a^2\dot{U}_- \\ \dot{\beta}a\dot{U}_- \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\gamma}'\dot{U}_- \\ \dot{\gamma}'a\dot{U}_- \\ \dot{\gamma}'a^2\dot{U}_- \end{pmatrix} = \dot{\beta}\dot{U}_- \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} + \dot{\gamma}'\dot{U}_- \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

У загальному випадку до вхідних затискачів А, В, С шестиполіусника з розкидом у різні напрямки параметрів елементів підключається

несиметрична трифазна напруга $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab} \\ \dot{U}_{bc} \\ \dot{U}_{ca} \end{pmatrix}$ основ-

ної частоти, яку можна подати у вигляді суми

симетричних систем НПП – $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix}$ і НЗП –

$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} \\ \dot{U}_{bc-} \\ \dot{U}_{ca-} \end{pmatrix}$ основної частоти. Використовуючи

принцип накладання в зв'язку з лінійністю схеми, вираз для напруги на виходах такого шестиполіусника можна записати як

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab} \\ \dot{U}_{bc} \\ \dot{U}_{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} \\ \dot{U}_{bc-} \\ \dot{U}_{ca-} \end{pmatrix} = \dot{\alpha} \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \dot{\gamma} \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} + \dot{\beta} \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} + \dot{\gamma}' \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Аналіз рівнянь перетворення трифазної напруги лінійними шестиполіусниками в цифрових вимірниках показників якості електроенергії

Кожний із трьох каналів вхідного трифазного блока вимірника такого показника якості електроенергії, як КНЗ, містить схему гальванічної розв'язки (СГР 1–3), схему масштабного перетворення (СМП 1–3) і фільтр низьких частот (ФНЧ 1–3) для зменшення можливої похибки від дискретизації в часі. Такі трифазні вхідні блоки разом доцільно розглядати як лінійний шестиполіусник з трьома входами і трьома виходами. Будемо використовувати отримані формули (2), (4), (5).

У загальному випадку до вхідних затискачів А, В, С вхідного трифазного блока з розкидом параметрів елементів підключається неси-

метрична трифазна напруга $\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab} \\ \dot{U}_{bc} \\ \dot{U}_{ca} \end{pmatrix}$ основної

частоти, яку можна подати у вигляді суми си-

метричних систем НПП – $\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ і НЗП –

$\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ основної частоти. Використовуючи

принцип накладання в зв'язку з лінійністю схеми, вираз для напруги на виходах такого вхідного трифазного блока можна записати як

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{ab} \\ \dot{U}_{bc} \\ \dot{U}_{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab+} \\ \dot{U}_{bc+} \\ \dot{U}_{ca+} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{U}_{ab-} \\ \dot{U}_{bc-} \\ \dot{U}_{ca-} \end{pmatrix} = \dot{\alpha}_B \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \dot{\beta}_B \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} + \left[\dot{\gamma}'_B \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \dot{\gamma}_B \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} \right], \quad (9)$$

де $\dot{\alpha}_B, \dot{\beta}_B$ – коефіцієнти передачі трифазним

вхідним блоком відповідно НПП $\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ і

НЗП $\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$, $\dot{\gamma}_B, \dot{\gamma}'_B$ – коефіцієнти пере-

творення трифазним вхідним блоком відповід-

но НПП $\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ і НЗП $\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$, які харак-

теризують розмір розкиду параметрів трифазного вхідного блока. У квадратних дужках (9) – сумарна векторна похибка, яка зумовлена розкидом параметрів вхідного трифазного блока.

Найжорсткіші вимоги до цього розкиду виникають при вимірюванні КНЗ, тому саме цей випадок розглянемо більш детально. Лише

другий доданок $\dot{\beta}_B \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ у (9) пропорцій-

ний НЗП, що вимірюється. Найбільший внесок у похибку від розкиду параметрів елементів

робить другий доданок $\dot{\gamma}_B \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$ у квадрат-

них дужках, який за модулем може бути сумір-

ним або навіть більшим за другий доданок

$$\dot{\beta}_B \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} \text{ у (9). Ця складова похибки має}$$

однакові частоту і послідовність фаз із корисним сигналом, і при подальшому вимірюванні відокремити цю складову похибки і зменшити її вплив на результат складно. Перший доданок в (5) вказує, у скільки разів (у $1/|\dot{\alpha}_B|$ разу) змінюється НПП, а другий – у скільки разів (у $1/|\dot{\beta}_B|$ разу) змінюється НЗП. Для підвищення точності вимірювання КНЗ необхідно зменшувати похибку від розкиду параметрів вхідного трифазного блока всіма можливими методами. При невиконанні додаткового коригування вплив цієї похибки при вимірюванні КНЗ може бути неприпустимо великим. Так, використати для кожної фазної напруги схеми гальванічної розв'язки НСРЛ 7850, які мають розкид коефіцієнтів підсилення 5 %, без додаткового коригування просто неможливо при вимірюванні КНЗ 2–5 %.

Висновки

Проведений аналіз рівнянь перетворення несиметричного вхідного трифазного блока вимірювача показників якості електроенергії показав, що на виходах цього блока з'являються такі складові:

- симетрична напруга прямої (зворотної) послідовності при підключенні до входів симетричної напруги прямої (зворотної) послідовності. Тобто симетрична напруга тієї самої послідовності, що підключена до входів блока. Ця симетрична напруга визначається відповідним коефіцієнтом передачі;

- симетрична напруга зворотної (прямої) послідовності при підключенні симетричної напруги прямої (зворотної) послідовності. Тобто також з'являється симетрична напруга протилежної послідовності порівняно з підключеною до входів блока. Ця напруга визначається відповідним коефіцієнтом перетворення і характеризує ступінь розкиду параметрів елементів вхідного блока. Саме ця складова при підключенні напруги прямої послідовності до входів вхідного блока може бути домінуючою, і необхідним є додаткове коригування цієї похибки для підвищення точності вимірювання коефіцієнта несиметрії за зворотною послідовністю основної частоти.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розробленні найбільш вдалих методів коригування розглянутих похибок для підвищення точності вимірювання симетричних складових трифазної напруги, які характеризують чотири важливі показники якості електроенергії трифазної електромережі.

1. Тесик Ю.Ф. Применение дифференциального метода к измерению показателей качества электроэнергии // *Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ*. – 2005. – № 3. – С.16–21.
2. *Устройство для измерения отклонений напряжения прямой последовательности*: А.с. № 1474562 СССР / В.В. Качаровский, Ю.Ф. Тесик, А.А. Тычина. – 1989, Бюл. № 15.
3. *Цифровой вимірювач коефіцієнтів несиметрії напруги в промисловій мережі*: Патент України UA № 75929 / Р.В. Петросян. – 2006, Бюл. № 6.
4. *Маков Д.К. Аналіз рівнянь перетворення аналого-цифрового вимірювача коефіцієнта несиметрії* // *Тези доп. V Міжнар. наук.-практ. конф. "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси"*, 15–16 травня 2012, Київ. – К., 2012. – С. 434–435.
5. *Анализ уравнений преобразования напряжений при каскадном соединении фильтров симметричных составляющих* / А.А. Щерба, Д.К. Маков, С.Н. Захарченко, Н.И. Супруновская // *Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ*. – 2005. – № 3. – С. 8–15.