

УДК 623.17.38

П.С. Євтух, докт. техн. наук, проф.; О.А. Буняк, канд. техн. наук, доц.;

С.М. Бабюк, канд. техн. наук; І.М. Сисак, канд. техн. наук

Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ПОПРАВОК У ПРОЦЕДУРІ АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК

**P. Yevtukh, Dr., Prof.; O. Buniak, Ph.D., Assoc.; S. Babiuk, Ph.D.; I. Sysak Ph.D.**  
**IMPLICATION OF COMPUTED CORRECTIONS AT THE PROCEDURE OF  
AUTOMATIC COMPENSATION OF SYSTEMATIC ERRORS**

Похибки первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) визначають точність функціонування систем вимірювання потужності та обліку електроенергії у високовольтних колах, систем релейного захисту в електромережах, схем управління високовольтним електроприводом і т.д. Тому задача зниження цих похибок є актуальною в електроенергетиці [1]

Однак при вимірюваннях комплексних вхідних величин можливість використання розрахункових поправок та алгоритму їх застосування вимагає додаткового обґрунтування.

Нехай вимірювальна величина описується виразом:

$$\dot{x} = x_0 \cdot e^{j\phi_0} - x_0 \cdot \cos \phi_0 + jx_0 \cdot \sin \phi_0, \quad (1)$$

де  $x_0$  – амплітуда вимірюваної величини;  $\phi$  – її фаза.

Вимірювана величина подається на вхід ПВП з номінальним коефіцієнтом перетворення ( $K_H$ ). Сигнал на виході ПВП описується виразом:

$$\dot{y} = K_H \cdot x_0 \cdot e^{j\phi_0} = K_H \cdot \dot{x}. \quad (2)$$

Насправді не існує ПВП з точно номінальним коефіцієнтом перетворення  $K_H$ . ПВП вносить похибку в передачу амплітуди і фази комплексної вимірюваної величини, що можна описати співвідношенням:

$$K = K_H + (1 + \delta_M) \cdot e^{-j\xi}, \quad (3)$$

де  $\delta_M$  – відносна мультиплікативна похибка передачі амплітуди;  $\xi$  – абсолютна похибка передачі фази.

У даному випадку передбачається справедливність співвідношення  $(\delta_M \cdot \xi) \ll 1$ . Вимірне значення сигналу  $\hat{y}$  на виході ПВП, враховуючи формулу (3), можна подати у вигляді:

$$\hat{y} = K_H \cdot x_0 (1 + \delta_M) \cdot e^{-j(\phi_0 - \xi)} = K_H \cdot \dot{x} \cdot (1 + \delta_M) \cdot e^{-j\xi} \quad (4)$$

Враховуючи, що  $|j\xi| \ll 1$ , можна замінити експоненту у виразі (4) наближенням першого порядку  $e^{-j\xi} = 1 - j\xi$ . Вираз (4) з урахуванням цього наближення набирає вигляду:

$$\hat{y} = K_H \cdot x_0 (1 + \delta_M) \cdot (1 - j\xi) = K_H \cdot \dot{x} \cdot (1 + \delta_M - j\xi) \quad (5)$$

При отриманні формули (5) знехтувана складова  $j\delta_M \xi$  як мала величина вищого порядку.

Вираз (5) свідчить, що фазову складову похибки слід трактувати як уявну компоненту мультиплікативної похибки.

Зазвичай під час вимірювань розділяють окремо активну та реактивну складові комплексної величини. Відповідно до такого розподілу вираз (5) набирає вигляду:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= K_H \cdot x_0 (\cos \phi_0 + j \sin \phi_0) \cdot (1 + \delta_M - j\xi) = \\ &= K_H \cdot x_0 \cos \phi_0 \cdot (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \phi_0) + j K_H \cdot x_0 \sin \phi_0 \cdot (1 + \delta_M - \xi \operatorname{ctg} \phi_0) = \\ &= \hat{y}_a \cdot (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \phi_0) + \hat{y}_p \cdot (1 + \delta_M - \xi \operatorname{ctg} \phi_0), \end{aligned} \quad (6)$$

де  $\hat{y}_a$ ,  $\hat{y}_p$  – активна та реактивна складові сигналу на виході ПВП, відповідно.

Оскільки, розглядається випадок, коли необхідно застосувати розрахункову поправку ( $\Pi$ ), то доцільно використати запропонований алгоритм [2]:

$$\hat{y}_n = \hat{y} + \Pi \cdot \hat{y}_{n-1} \quad (7)$$

де  $n$  – номер ітерації у процедурі компенсації похибки.

Для ефективної роботи алгоритму у разі комплексного сигналу поправка повинна мати вигляд:

$$\Pi_a = \hat{y}_a \cdot (\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0) \quad (8)$$

де  $\Pi_a$  – поправка до активної складової сигналу на виході ПВП, а також:

$$\Pi_p = \hat{y}_p \cdot (\delta_M - \xi \operatorname{ctg} \hat{\phi}_0) \quad (9)$$

де  $\Pi_p$  – поправка до реактивної складової сигналу на виході ПВП.

Величина  $\hat{\phi}_0$  у формулах для поправок – це виміряна із похибкою  $\xi$ , фаза сигналу на виході ПВП.

Ітераційна процедура компенсації похибки активної складової сигналу на виході ПВП має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{a1} &= K_H \cdot x_0 \cos \phi_0 \cdot (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0) + K_H \cdot x_0 \cdot (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0) \cdot (\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0) = \\ &= K_H \cdot x_0 \cos \phi_0 \cdot (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^2 \\ \hat{y}_{a2} &= K_H \cdot x_0 \cos \phi_0 \cdot (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^3 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \hat{y}_{an} &= K_H \cdot x_0 \cos \phi_0 \cdot (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^{n+1} \end{aligned}$$

Похибки  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  після кожної із цих ітерацій визначаються за формулою

$\delta = 1 - \hat{y}_{an} / \hat{y}$  і описуються виразами:

$$\delta_1 = -(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^2; \delta_2 = -(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^3; \dots; \delta_n = -(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^{n+1}.$$

Оскільки,  $-(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0) \ll 1$ , то очевидно, що  $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = 0$ , тобто теоретична межа, до якої прямує значення похибки  $\delta_n$  при нарощуванні кількості ітерацій, дорівнює нулю.

Отримані результати свідчать про ефективність застосування розрахункових поправок у вигляді (8) і (9) з метою компенсації похибок одночасно активної та реактивної складових сигналу на виході ПВП.

### Література

1. Євтух П. Оцінки похибок джерел сигналів електроенергетичних систем за навантаженням / П. Євтух, С Бабюк. – Метрологія та прилади. – 2012. – № 1 (33). – С. 49-53.
2. Євтух П. С. Про алгоритм корекції похибок вимірювальних трансформаторів струму. Енергетика та електрифікація / Євтух П.С., Літков В.О. – Київ, 1995, – №5. – С. 38 – 40.