

УДК 534.782:621.3

Євтух П.

Тернопільський державний технічний університет

ВИБІР ПОПРАВОК ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ У КОЛАХ ІЗ ТРАНСФОРМАТОРАМИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

© Євтух П., 2000

У статті розглянуті особливості застосування алгоритму автоматичної компенсації систематичних похибок за допомогою розрахункових поправок для випадку вимірювання комплексних вхідних величин

Під час пусконаладжувальних робіт у колах із високовольтними трансформаторами струму та напруги по місто їх експлуатації поки-що не існує засобів для експериментального визначення поправок з метою компенсації систематичних похибок, зумовлених неточними значеннями номінального коефіцієнта перетворення цих вимірювальних засобів. Для таких випадків відомий спосіб* заміни експериментальних поправок близькими до них розрахунковими, застосування яких дає змогу істотно зменшити значення систематичних похибок результатів вимірювання за рахунок збіжності ітераційної процедури компенсації, побудованої у відповідності із спеціально розробленим алгоритмом. Такий підхід виправдав себе на практиці тим, що дані для визначення розрахункових поправок часто можна взяти із технічних паспортів вимірювальних трансформаторів, де ці дані наведені у вигляді похибок, отриманих при випробуваннях вимірювальних трансформаторів на високоточному випробувальному стенді заводу-виготовлювача. Однак успіх від застосування таких даних залежить ще і від вдалого вибору розрахункових поправок, які використовують для компенсації систематичних похибок результатів вимірювання.

У цій статті наведені формули для розрахункових поправок і подано їх обґрунтування.

Нехай вимірювальна величина описується виразом

$$\dot{x} = x_0 e^{j\varphi_0} = x_0 \cos \varphi_0 + jx_0 \sin \varphi_0, \quad (1)$$

де x_0 – амплітуда вимірюваної величини, φ – її фаза.

Вимірювана величина подається на вхід первинного вимірювального перетворювача (ПВП) з номінальним коефіцієнтом перетворення K_H . Сигнал на виході ПВП описується виразом

$$\dot{y} = K_H x_0 e^{j\varphi_0} = K_H \dot{x}. \quad (2)$$

* Євтух П.С. Літков А.О. Про алгоритм корекції похибок вимірювальних трансформаторів струму // *Енергетика і електрифікація*. 1995. № 5. С.38–40.

В дійсності, 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

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

де $\delta_{..}$ – відносна мультиплікативна похибка передачі амплітуди; ξ – абсолютна похибка передачі фази.

У цьому випадку передбачається справедливість співвідношення $(\delta_{..}\xi) \ll 1$.

Вимірне значення сигналу \hat{y} на виході ПВП, враховуючи формулу (3), можна подати так:

$$\hat{y} = K_H x_0 (1 + \delta_{..}) e^{-j(\varphi_0 - \xi)} = K_H \dot{x} (1 + \delta_{..}) e^{-j\xi}. \quad (4)$$

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

$$\hat{y} = \dot{x} K_H (1 + \delta_{..})(1 - j\xi) = \dot{x} K_H (1 + \delta_{..} - j\xi). \quad (5)$$

При отриманні формули (5) знехтувано складовою $j\delta_{..}\xi$ як малою величиною вищого порядку.

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

Зазвичай при вимірюваннях розділяють окремо активну та реактивну складові комплексної величини. Відповідно до такого розділення вираз (5) набуває вигляду

$$\begin{aligned} \dot{y} &= x_0 K_H (\cos \varphi_0 + j \sin \varphi_0) (1 + \delta_{..} - j\xi) = K_H x_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \varphi_0) + \\ & j K_H x_0 \sin \varphi_0 (1 + \delta_{..} - \xi \operatorname{ctg} \varphi_0) = \hat{y}_a (1 + \delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \varphi_0) + \hat{y}_p (1 + \delta_{..} - \xi \operatorname{ctg} \varphi_0), \end{aligned} \quad (6)$$

де y_a і y_p – відповідно активна та реактивна складові сигналу на виході ПВП.

Оскільки розглядається випадок, коли необхідно застосувати розрахункову поправку Π , то доцільно використати запропонований в статті [1] алгоритм

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

де n – номер ітерації в процедурі компенсації похибки.

Для ефективної роботи алгоритму у випадку комплексного сигналу поправка повинна мати вигляд

$$\Pi_a = \hat{y}_a (\delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \hat{\varphi}_0), \quad (8)$$

де Π_a – поправка до активної складової сигналу на виході ПВП, а також

$$\Pi_p = -\hat{y}_p (\delta_{..} - \xi \operatorname{ctg} \hat{\varphi}_0), \quad (9)$$

де Π_p – поправка до реактивної складової сигналу на виході ПВП.

Величина $\hat{\varphi}_0$ у формулах для поправок – це вимірня із похибкою ξ фаза сигналу на виході ПВП.

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

$$\hat{y}_{a1} = K_H x_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \hat{\varphi}_0) + K_H x_0 (1 + \delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \hat{\varphi}_0) (\delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \hat{\varphi}_0) = \\ = K_H x_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \hat{\varphi}_0)^2;$$

$$\hat{y}_{a2} = K_H x_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \hat{\varphi}_0)^3;$$

.....

$$\hat{y}_{an} = K_H x_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \hat{\varphi}_0)^{n+1};$$

Похибки $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ після кожної із цих ітерацій визначають за формулою $\delta = 1 - \hat{y}_{an} / \hat{y}$ і описують формулами

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

Оскільки $(\delta_{..} + \xi \operatorname{tg} \hat{\varphi}_0) \ll 1$, то очевидно, що $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = 0$, тобто теоретична межа, до

якої прямує значення похибки δ_n , при нарощуванні кількості ітерацій дорівнює нулю.

Аналогічний результат можна отримати внаслідок застосування ітераційної процедури компенсації поправки до реактивної складової сигналу на виході ПВП.

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.

Особливість застосування розрахункових поправок для компенсації похибок складових комплексного сигналу полягає ще й у тому, що ефективність застосування алгоритму (7) залежить і від значення кута φ_0 . Лише при кутах $6^\circ < \varphi_0 < 84^\circ$ значення функцій $\operatorname{tg} \varphi_0$ і $\operatorname{ctg} \varphi_0$ у формулах (8) і (9) знаходяться в межах від 0,1 до 10, тому алгоритм (7) придатний для компенсації похибок одночасно у активної та реактивної складових вхідного сигналу. При інших значеннях кута φ необхідні додаткові дослідження алгоритму на його ефективність.