

УДК 621.314.213.08

П. Євтух, докт. техн. наук; Н. Куземко, канд. техн. наук; С. Баб'юк

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

СТРУКТУРА АЛГОРИТМІВ АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК МАСШТАБУЮЧИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Резюме. Обґрунтовано структуру варіантів алгоритму автоматичної компенсації систематичної мультиплікативної похибки у вигляді ітераційної процедури в первинних вимірювальних перетворювачах. Розглянуто придатність алгоритму для компенсації адитивної, адитивно-мультиплікативної похибок при вимірюваннях комплексних величин та потужностей. Модель можна застосувати в системах обліку електроенергії для підвищення їхньої точності, зробивши поправки в результатах вимірювань у процесі їхньої роботи.

Ключові слова: первинний вимірювальний перетворювач, похибка, автоматична компенсація, модель.

P.Yevtoch, N. Kuzemko, S. Babiuk

SCALING MEASURING CONVERTERS SYSTEMATIC DEVIATION AUTOMATIC COMPENSATION ALGORITHM STRUCTURE

The summary. There has been proved systematic multiplicative deviation automatic compensation algorithms set structure. It has been set up as a step-by-step procedure in primary measuring converters. There has been considered an algorithm validity for additive, additive-multiplicative deviation compensation at complex values and at power measurements. The model can be applied in power supply counting systems to provide better accuracy by measuring results corrections as non-stop process.

Key words: primary measuring converter, deviation, automatic compensation, model.

Умовні позначення:

K_H – номінальний коефіцієнт перетворення первинного вимірювального перетворювача;

Δ – абсолютна мультиплікативна похибка;

δ – відносна мультиплікативна похибка;

Δ_a – абсолютна адитивна похибка;

δ_a – відносна адитивна похибка.

Постановка проблеми

Підвищити точність вимірювання масштабуючих первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) можна унаслідок компенсації систематичних похибок, процедуру якої здійснюють за допомогою поправок [1]. Ці поправки визначають експериментально на вимірювальному стенді за допомогою зразкової апаратури. Однак під час пусконаладжувальних робіт у колах з ПВП експериментальну поправку часто визначити неможливо через нестачу необхідних технічних засобів. Проте у технічних паспортах ПВП є відомості про значення похибок номінального коефіцієнта перетворення, отримані на установках високої точності заводу виробника, використавши їх, можна вирахувати поправки для компенсації похибок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Покази масштабуючих первинних вимірювальних перетворювачів, як правило, спотворені адитивними та мультиплікативними похибками. Часто домінуючою є мультиплікативна похибка, що має систематичний характер. Це дає змогу

скомпенсувати її автоматично, за допомогою поправок [2,3], тобто замінити експериментальну поправку близькою до неї розрахунковою. Однак існують певні труднощі з корекцією мультиплікативної похибки, пов'язані зі зміною величини мультиплікативної похибки в діапазоні вимірюваної величини, алгоритми ж компенсації цієї похибки можуть мати різну ефективність [4,5].

Мета роботи

Запропонувати найефективніший алгоритм автоматичної компенсації систематичної складової похибки та дослідити, чи придатний такий алгоритм компенсації для випадку, коли характеристики перетворювачів спотворені одночасно похибками адитивного та мультиплікативно-адитивного характеру.

Постановка задачі

Якщо для певного ПВП відомо номінальний коефіцієнт перетворення K_H , то зв'язок між вихідною $X_{вих}$ та вхідною $X_{вх}$ величиною описуємо виразом [1]

$$X_{вих} = K_H X_{вх}. \quad (1)$$

Фактичне значення коефіцієнта перетворення відрізняється від номінального, оскільки воно спотворене похибкою.

Виникає завдання обґрунтувати вибір алгоритму, який дає змогу найефективніше скомпенсувати мультиплікативну похибку поправками за допомогою ітераційної процедури (при цьому немає обмежень на кількість ітерацій) та дослідити придатність цього алгоритму для компенсації адитивних та адитивно-мультиплікативних похибок. Найефективнішим вважають алгоритм, який дає змогу скомпенсувати ці похибки теоретично до нуля.

Базовий алгоритм автоматичної компенсації мультиплікативної похибки

У даному випадку визначення поправок за допомогою перевірної установки буде неефективним, тому що компенсацію похибки необхідно здійснювати у довільній точці вимірювальної шкали, а у кожній точці величина поправки інша. При збільшенні точності кількість таких поправок також збільшується. Крім того, якщо необхідно скомпенсувати мультиплікативну похибку до нуля, то точок компенсації на вимірювальній шкалі буде надто багато. Однак відомо, що в процедурі компенсації у кожній із точок можна використовувати розрахункову поправку, яка є детермінованою функцією від емпіричної поправки, визначеної на перевірній установці [6]. При такому підході мультиплікативна похибка спотворюватиме залежність (1) до виду

$$\overset{\Delta}{X}_{вих} = K_H (1 + \alpha) X_{вх}, \quad (2)$$

де $\overset{\Delta}{X}_{вих}$ – результат вимірювання, спотворений мультиплікативною похибкою, α – постійна величина, яка є оцінкою спотворення коефіцієнта перетворення ($\alpha \ll 1$). Величину α визначають зі співвідношень (1), (2):

$$\alpha = 1 - \overset{\Delta}{X}_{вих} / X_{вх}. \quad (3)$$

На рис.1 зображено зв'язок між вихідною та вхідною величинами згідно із залежностями (1), (2).

Якби можна було отримати дійсне значення $X_{вих}$ для будь-якої точки шкали на перевірній установці, то можна було б ввести поправку Δ згідно з виразом

$$\Delta = -\alpha K_H X_{вх}. \quad (4)$$

Далі, додаючи цю поправку до кожного вимірюваного значення $\overset{\Delta}{X}_{вих}$, ми б отримали точне значення вимірюваної величини. Проте в процесі вимірювання відомі лише наближені значення $X_{вх}$, тому є можливість отримати значення лише розрахункових поправок $\overset{\Delta}{\Delta}$, які для першого вимірюваного значення описують залежність

$$\Delta = -\alpha K_H \dot{X}_{ex} = \alpha K_H \dot{X}_{ex} (1 - \alpha) = \alpha \dot{X}_{ex}. \quad (5)$$

Ця розрахункова поправка відрізняється від Δ . Проте, застосувавши ітераційну процедуру за відповідним алгоритмом, можна добитись компенсації мультиплікативної похибки, застосувавши розрахункову похибку. Використавши вираз (5), скоректоване вимірне значення для n -го кроку ітерації матиме вигляд

$$\dot{X}_{вихn} = \dot{X}_{вих} + \alpha \dot{X}_{вих(n-1)} \quad (6)$$

або

$$\dot{X}_{вихn} = \dot{X}_{вих(n-1)} + \alpha \dot{X}_{вих(n-1)}. \quad (7)$$

Ефективність використання кожного із запрограмованих алгоритмів оцінюємо величиною відносної похибки δ_n після застосування n ітерацій. Для визначення відносної похибки знайдемо вираз, який отримаємо після застосування кожної ітерації, тобто вирази $\dot{X}_{вих1}$, $\dot{X}_{вих2}$, ..., $\dot{X}_{вихn}$.

Для алгоритму (6) ці вирази матимуть такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{вих1} &= X_{ex} K_H (1 - \alpha) - \alpha X_{ex} K_H (1 - \alpha) = X_{ex} (1 - \alpha)^2, \\ \dot{X}_{вих2} &= X_{ex} K_H (1 - \alpha) - \alpha X_{ex} K_H (1 - \alpha) + \alpha^2 X_{ex} K_H (1 - \alpha) = X_{ex} (1 - \alpha)(1 - \alpha + \alpha^2), \\ \dot{X}_{вих3} &= X_{ex} K_H (1 - \alpha) - \alpha X_{ex} K_H (1 - \alpha)(1 - \alpha + \alpha^2) = X_{ex} (1 - \alpha)(1 - \alpha + \alpha^2)\alpha, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{X}_{вихn} = X_{ex} K_H (1 - \alpha) [1 - \alpha + \alpha^2 - \alpha^3 + \alpha^4 - \dots - (1)^n \alpha^n].$$

Співвідношення для $\dot{X}_{вихn}$ дає вираз для відносної похибки n -го кроку алгоритму (6) у вигляді

$$\delta_n = \alpha \frac{1 - (-\alpha)^n}{1 + \alpha}. \quad (9)$$

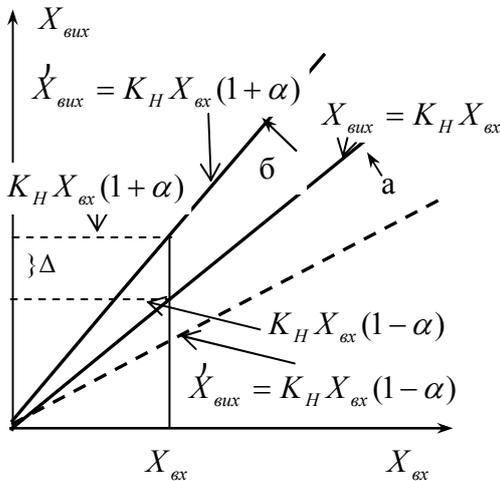


Рисунок 1 – Зв'язок між вхідною і вихідною величинами у несптвореному (а) та сптвореному (б) вигляді

$$\begin{aligned} \dot{X}_{вих1} &= X_{ex} K_H (1 - \alpha) - \alpha X_{ex} K_H (1 - \alpha) = X_{ex} (1 - \alpha)^2, \\ \dot{X}_{вих2} &= X_{ex} K_H (1 - \alpha)^2 - \alpha X_{ex} K_H (1 - \alpha)^2 = X_{ex} (1 - \alpha)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{X}_{вихn} = X_{ex} K_H (1 - \alpha)^{n+1}.$$

Співвідношення для $\dot{X}_{вихn}$ дає вираз для відносної похибки n -го кроку алгоритму (7) у вигляді

$$\delta_n = \alpha^{n+1}. \quad (12)$$

Ефективність застосування алгоритму (7) визначають границею, до якої прямує величина δ_n при збільшенні кількості ітерацій, тобто

Ефективність застосування алгоритму (6) визначають границею, до якої прямує величина δ_n при збільшенні кількості ітерацій, тобто

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha \frac{1 - (-\alpha)^n}{1 + \alpha} = \alpha. \quad (10)$$

Отриманий результат свідчить про те, що застосування алгоритму (6) не дає потрібного результату. Кінцева похибка результату вимірювання після n ітерацій не зменшується і дорівнює α .

Застосувавши алгоритм (7), для отримання виразів $\dot{X}_{вих1}$, $\dot{X}_{вих2}$, ..., $\dot{X}_{вихn}$, після кожної з ітерацій матимемо такі результати:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha^{n+1} = 0. \quad (13)$$

Отже, значення мультиплікативної похибки при збільшенні ітерацій цього алгоритму прямує до нуля. Тому лише застосування алгоритму (7) в процесі автоматичної компенсації мультиплікативної похибки ПВП дає бажаний результат.

Отже, будувати ітераційну процедуру корекції, використовуючи для компенсації похибок скоректовані значення вимірюваної величини, недоцільно. Ітераційну процедуру необхідно будувати, застосовуючи поправки до першого вимірюваного значення.

Алгоритм компенсації похибок адитивного та адитивно-мультиплікативного характеру

Якщо похибка ПВП зумовлена лише впливом адитивної складової похибки, то для її автоматичної компенсації застосуємо базовий алгоритм, призначений для компенсації мультиплікативної похибки. Для цього подамо цей алгоритм у вигляді

$$X_n = X_1 + P_n, \quad (14)$$

де X_1 – перше вимірне значення сигналу на виході ПВП, P_n – значення поправки на n -ій ітерації. Далі розглянемо, як працює цей алгоритм у даному випадку і чи буде зменшуватись величина похибки зі збільшенням кількості ітерацій.

Позначимо адитивну похибку Δ , вимірне значення величини на виході ПВП можна визначити так:

$$X = K_H Y + \Delta, \quad (15)$$

де K_H – значення номінального коефіцієнта перетворення, Y та X – відповідно значення величини на вході та виході перетворювача.

Похибка Δ має систематичний характер, тому її можна скомпенсувати поправками, які визначають за результатами вимірювального експерименту із застосуванням установки для перевірки перетворювача. Формула для визначення поправки матиме вигляд

$$P_E = \delta_a Y / K_H, \quad (16)$$

де $\delta_a = \Delta / Y$ – значення відносної адитивної похибки, Y – значення сигналу на вході перетворювача, визначене з високою точністю за допомогою перевіреної установки.

Проте застосувати перевірку установки при експлуатації перетворювача не завжди можливо, тобто не завжди можна скористатися традиційним способом компенсації похибки Δ за допомогою поправок. Тому спробуємо визначити не експериментальне, а розрахункове значення поправки P у вигляді

$$P = -\delta_a (K_H Y + \delta_a Y) / K_H. \quad (17)$$

Значення поправки, отримане з виразу (17), буде трохи відрізнятися від значення, отриманого експериментально з виразу (16).

Скориставшись виразом (17), опишемо результат процедури корекції величини вимірюваного сигналу X згідно з алгоритмом 14 у вигляді

$$X_1 = K_H Y + \delta_a Y - \delta_a (K_H Y + \delta_a Y) / K_H \text{ або } X_1 = K_H Y - \delta_a^2 Y / K_H. \quad (18)$$

Другий доданок у формулі (18) є виразом для визначення величини абсолютного значення адитивної похибки Δ_a після закінчення процедури корекції вимірюваного значення X , тобто

$$\Delta_a = \delta_a^2 Y / K_H. \quad (19)$$

Отримане значення Δ_a – величина другого порядку малості. Отже, алгоритм (14), який застосовувався для корекції за точністю вихідного сигналу ПВП за допомогою поправок при наявності лише мультиплікативної похибки, придатний для застосування при наявності адитивної похибки.

Розглянемо складніший випадок – наявність одночасно мультиплікативної та адитивної похибок і спробуємо застосувати алгоритм (14) у цьому узагальненому випадку. Формула для визначення поправки у цьому випадку, враховуючи (17), матиме вигляд:

$$P_{\Sigma} = \alpha K_H Y - \delta_a^2 Y / K_H, \quad (20)$$

де P_{Σ} – узагальнена поправка при наявності одночасно адитивної та мультиплікативної похибок, α – величина, за допомогою якої оцінюють відхилення значення коефіцієнта перетворення K_H від його номінального значення під впливом мультиплікативної похибки.

Результат процедури корекції вихідного сигналу за допомогою алгоритму (14) в даному випадку буде таким:

$$X = K_H (1 - \alpha) Y + \delta_a Y - \alpha [K_H (1 - \alpha) Y + \delta_a Y] - \delta_a [K_H (1 + \alpha) Y + \delta_a Y] / K_H. \quad (21)$$

Після перетворення цього виразу отримаємо

$$X = K_H Y - \alpha^2 K_H Y - 2\alpha \delta_a Y - \delta_a^2 Y / K_H. \quad (22)$$

У цьому співвідношенні можна виділити нову адитивну та мультиплікативну складові загальної похибки, які мають другий порядок малості, а також складову загальної похибки, що пов'язана з впливом одночасно адитивної та мультиплікативної похибок, яка також має другий порядок малості. Отже, в результаті використання запропонованого алгоритму всі ці складові мають другий порядок малості, а це свідчить про те, що алгоритм придатний для автоматичної корекції похибок ПВП для цього узагальненого випадку.

Компенсація мультиплікативних похибок ПВП комплексних величин

Якщо вимірювана величина, що описується виразом

$$\underline{X} = X_0 e^{j\varphi_0} = X_0 \cos \varphi_0 + jX_0 \sin \varphi_0, \quad (23)$$

де X_0 – амплітуда вимірюваної величини, а φ_0 – її фаза, подається на вхід ПВП з номінальним коефіцієнтом перетворення K_H , то сигнал на вході буде описуватися виразом

$$\underline{Y} = K_H X_0 e^{j\varphi_0} = K_H \underline{X}. \quad (24)$$

ПВП вносить похибку в передачу амплітуди та фази комплексної вимірюваної величини, що можна описати співвідношенням

$$K = K_H (1 + \delta_M) e^{-j\xi}, \quad (25)$$

де δ_M – відносна мультиплікативна похибка передачі амплітуди, ξ – абсолютна похибка передачі фази, $(\delta_M, \xi) \ll 1$.

Вимірне значення сигналу \hat{Y} на виході ПВП можна подати так:

$$\hat{Y} = K_H X_0 (1 + \delta_M) e^{-j(\varphi_0 - \xi)} = K_H \underline{X} (1 + \delta_M) e^{-j\xi}. \quad (26)$$

Враховуючи, що $(\delta_M, \xi) \ll 1$, можна замінити експоненту у виразі (26) наближенням першого порядку $e^{-j\xi} = 1 - j\xi$. Враховуючи це та знехтувавши малою величиною вищого порядку $j\delta\xi$, запишемо (26) так:

$$\hat{Y} = K_H \underline{X} (1 + \delta_M) (1 - j\xi) = K_H \underline{X} (1 + \delta_M) e^{-j\xi}. \quad (27)$$

З виразу бачимо, що фазова складові похибки є уявною складовою мультиплікативної похибки.

При вимірюваннях переважно розділяють окремо активну та реактивну складові комплексної величини. Відповідно до цього вираз (27) матиме вигляд

$$\hat{Y} = K_H X_0 (\cos \varphi_0 + j \sin \varphi_0) (1 + \delta_M - j\xi) = K_H X_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \varphi_0) + jK_H X_0 \sin \varphi_0 (1 + \delta_M - \xi \operatorname{ctg} \varphi_0) = \hat{Y}_a (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \varphi_0) + \hat{Y}_p (1 + \delta_M - \xi \operatorname{ctg} \varphi_0), \quad (28)$$

де \hat{Y}_a та \hat{Y}_p – активна та реактивна складові сигналу на виході ПВП.

Для застосування розрахункової поправки Π доцільно використати алгоритм

$$\hat{Y}_n = \hat{Y} + \Pi \hat{Y}_{n-1}, \quad (29)$$

де n – номер ітерації у процесі компенсації похибки.

Для ефективної роботи алгоритму при комплексному вхідному сигналі поправка для активної складової сигналу повинна мати вигляд

$$\Pi_a = \hat{Y}(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0), \quad (30)$$

а поправка для реактивної складової –

$$\Pi_p = -\hat{Y}_p(\delta_M - \xi \operatorname{ctg} \hat{\phi}_0), \quad (31)$$

де $\hat{\phi}_0$ – виміряна з похибкою ξ фаза сигналу на виході ПВП.

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

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{a1} &= K_H X_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0) + K_H X_0 (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0) = \\ &= K_H X_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^2, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\hat{Y}_{a2} = K_H X_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^3.$$

.....

$$\hat{Y}_{an} = K_H X_0 \cos \varphi_0 (1 + \delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^{n+1}.$$

Похибки після кожної з ітерацій визначають з виразу $\delta_M = 1 - \hat{Y}_{an} / \hat{Y}$ так:

$$\delta_1 = -(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^2, \delta_2 = -(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^3, \dots, \delta_n = -(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0)^{n+1}. \quad (33)$$

Оскільки $(\delta_M + \xi \operatorname{tg} \hat{\phi}_0) \ll 1$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = 0$, тобто при збільшенні кількості ітерацій значення похибки прямує до нуля.

Аналогічно здійснюють ітераційну процедуру компенсації похибки реактивної складової сигналу на виході ПВП.

Отримані результати свідчать про ефективність застосування цих розрахункових поправок (30) та (31) з метою компенсації похибок одночасно активної та реактивної складових сигналу на виході ПВП.

Особливості застосування розрахункових поправок для компенсації складових комплексного сигналу в тому, що ефективність застосування алгоритму (29) залежить від значення кута φ_0 . Аналіз показує, що при $6^\circ < \varphi_0 < 84^\circ$ значення функцій $\operatorname{tg} \varphi_0$ та $\operatorname{ctg} \varphi_0$ у формулах (30), (31) будуть у межах від 0,1 до 10, тому лише в цьому випадку алгоритм (29) придатний для компенсації похибок одночасно активної та реактивної складових вхідного сигналу. При інших значеннях кута φ_0 необхідно додатково дослідити ефективність даного алгоритму.

Компенсація систематичних похибок при вимірюванні потужності

Результати вимірювання потужності у високовольтних колах спотворюють систематичні похибки, зумовлені відхиленнями від номінальних значень коефіцієнтів трансформації струму K_{HI} та напруги K_{HU} високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Такі відхилення оцінюють величинами відносних похибок передачі амплітуди струму δ_I та напруги δ_U , а також величинами абсолютних похибок передачі фази ξ_I , ξ_U . Комплекс повної потужності \underline{S} , визначений через сигнали на виході вимірювальних трансформаторів з урахуванням їх похибок, описують виразом

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = U_0 \exp(j\varphi_U) K_{HU} (1 + \delta_U) \exp(j\xi_U) I_0 \exp(-j\varphi_I) K_{HI} (1 + \delta_I) \exp(-j\xi_I) =$$

$$= U_0 I_0 \exp[-j(\varphi_U - \varphi_I)] K_{HU} K_{HI} (1 + \delta_U)(1 + \delta_I) \exp[-j(\xi_U - \xi_I)] , \quad (34)$$

де $\underline{U} = U_0 \exp j(\varphi_U)$ – комплекс напруги на виході трансформатора напруги,

$\underline{I}^* = I_0 \exp j(-\varphi_I)$ – комплексно-спряжене значення струму на виході трансформатора струму, $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$ – кут зсуву фаз між сигналами вимірювальних трансформаторів.

Введемо такі позначення: $\Psi = \xi_U - \xi_I$, $K_\Sigma = K_{HU} K_{HI}$, $S_0 = U_0 I_0$. Вважатимемо також, що $\exp[-j(\xi_U - \xi_I)] \approx 1 - j\Psi$, а $\exp(j\varphi) = \cos \varphi + j \sin \varphi$. Враховуючи це, запишемо вираз (34) так:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= K_\Sigma S_0 \cos \varphi (1 + \delta_U + \delta_I + \Psi \operatorname{tg} \varphi) + K_\Sigma S_0 \sin \varphi (1 + \delta_U + \delta_I - \Psi \operatorname{ctg} \varphi) = \\ &= K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1) + j K_\Sigma Q_0 (1 + \alpha_2), \end{aligned} \quad (35)$$

де $P_0 = S_0 \cos \varphi$, $Q_0 = S_0 \sin \varphi$ – активна та реактивна складові повної потужності, $\alpha_1 = 1 + \delta_U + \delta_I + \Psi \operatorname{tg} \varphi$, $\alpha_2 = 1 + \delta_U + \delta_I - \Psi \operatorname{ctg} \varphi$.

Запишемо вимірні активну \dot{P} та реактивну \dot{Q} потужності таким чином:

$$\dot{P} = K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1), \quad \dot{Q} = K_\Sigma Q_0 (1 + \alpha_2), \quad (36)$$

де $P = K_\Sigma P_0$, $Q = K_\Sigma Q_0$ – значення активної та неактивної потужності, не спотворені відхиленнями коефіцієнтів трансформації вимірювальних трансформаторів напруги та струму від номінальних значень.

Якби існували засоби, за допомогою яких можна було б на високовольтній стороні вимірювальних трансформаторів з високою точністю визначити значення P та Q , то в такому випадку можна було б експериментально знайти поправки для вимірних значень активної $\Pi'_a = \alpha_1 P$ та реактивної $\Pi'_p = \alpha_2 Q$ потужностей. Однак таких засобів немає, тому замість невідомих P та Q у формулах для поправок доводиться використовувати близькі до них, проте неточні вимірні значення \dot{P} і \dot{Q} . Поправки в цьому випадку розраховують за формулами

$$\Pi_a = -\alpha_1 \dot{P}, \quad \Pi_p = \alpha_2 \dot{Q}, \quad (37)$$

де $\Pi_a = -(1 + \delta_U + \delta_I + \Psi \operatorname{tg} \varphi) U_0 I_0 \cos \varphi_0$ – поправка до вимірного значення активної потужності, $\Pi_p = -(1 + \delta_U + \delta_I - \Psi \operatorname{ctg} \varphi) U_0 I_0 \sin \varphi_0$ – поправка до вимірного значення реактивної потужності.

Недоліки такого підходу можна усунути, якщо застосувати базовий алгоритм ітераційної процедури компенсації систематичних похибок. Відповідні ітерації, побудовані із застосуванням поправки Π_a до вимірного значення \dot{P} активної потужності, мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 &= K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1) - \alpha_1 K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1) = K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1^2), \\ \dot{P}_2 &= K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1) - \alpha_1 K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1^2) = K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1^3), \\ \dot{P}_3 &= K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1) - \alpha_1 K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1^3) = K_\Sigma P_0 (1 + \alpha_1^4), \\ &\dots \\ \dot{P}_n &= K_\Sigma P_0 [1 - \alpha_1^{n+1} (-1)^n]. \end{aligned} \quad (38)$$

При збільшенні кількості ітерацій процедура компенсації приведе до такого результату:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \dot{P}_n = K_\Sigma P - (-1)^n K_\Sigma P_0 \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_1^{n+1} = P, \quad (39)$$

тобто результат застосування ітераційної процедури прямує до неспотвореного значення P активної потужності.

Аналогічний результат дає застосування ітераційної процедури компенсації до реактивної потужності.

Отриманий результат свідчить про ефективність застосування поправок, поданих формулами (37) для корекції за точністю результатів вимірювання активної та реактивної потужностей у високовольтних колах. Необхідні відомості для отримання чисельних значень поправок можна взяти з паспортних даних відповідних вимірювальних трансформаторів.

Висновки

Запропонований у статті алгоритм компенсації мультиплікативної, адитивної та адитивно-мультиплікативної складових похибки, а також похибок при вимірюванні комплексних величин, зокрема потужності, доцільно застосовувати під час пусконаладжувальних робіт у колах з високовольтними трансформаторами струму та напруги за місцем їх експлуатації. Для цього застосовують розрахункові поправки, що дає змогу істотно зменшити значення похибок результатів вимірювання унаслідок збіжності ітераційної процедури компенсації, побудованої відповідно до запропонованого алгоритму. Такий підхід виправдовує себе на практиці тому, що дані для визначення розрахункових поправок можна взяти з технічних паспортів вимірювальних трансформаторів.

Література

1. Любимов М.И. Проверка средств электрических измерений: [Справочная книга] / Любимов М.И., Форсилова Н. Д., Шапиро Е. З. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.
2. Таланчук П.М. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах / Таланчук П.М., Скрипник Ю.О., Дуброний В.О. – Київ: Райдуга, 1994. – 664с.
3. Основи метрології та вимірювальної техніки / [М.Дорожовець, В.Мотало, Б.Стадник та ін.] – Львів, Видавництво Львівської політехніки, 2005. – 532с.
4. Скрипник Ю.О. Цифрові вимірювачі з корекцією похибок / Юрій Олександрович Скрипник. – Київ: Вища школа, 1989. – 148с.
5. Метрологія та вимірювальна техніка / [під ред. Є.С.Поліщука.] – Львів, Видавництво Львівської політехніки, 2003. – 544с.
6. Євтух П.С., Пелешок Т.М. Алгоритм автоматичної компенсації мультиплікативних похибок у масштабуючих первинних вимірювальних перетворювачах: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції ["Вимірювання витрат та кількості газу"].– Івано-Франківськ, 2005.– С.40–41.

Одержано 22.02.2010 р.