

УДК 621.314.213.08

П. Євтух, докт. техн. наук; С. Бабюк; Т. Кислиця

Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

ОЦІНКА ГРАНИЧНОЇ ТОЧНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ДЖЕРЕЛ СТРУМОВИХ СИГНАЛІВ НА БАЗІ МОДЕЛІ, ПОБУДОВАНОЇ ЗА ЇХ ПАСПОРТНИМИ ДАНИМИ

Резюме. Подано матеріал, який доводить, що після компенсації систематичних складових похибки високовольтних джерел сигналів струму похибка представленої інформації знизиться приблизно в 5 разів також. Визначено границю зниження похибки, яка досягається після компенсації систематичної складової похибки. Ця величина обмежується можливостями метрологічного забезпечення на заводі-виробнику і являє собою похибку порядку 0,05%.

Ключові слова: сигнал, джерела сигналів струму, трансформатор струму, похибка, модель.

P. Yevtukh, S. Babyuk, T. Kyslytsya

ESTIMATION OF THE LIMIT ACCURACY OF THE CURRENT SIGNALS IN THE HIGH VOLTAGE SOURCES BASED ON THE MODEL BUILT ACCORDING TO THEIR SPECIFICATION

The summary. The role and significance of electrical energy losses in tariff setting and energy system development is evident from the fact that in the electrical energy transmission the cost of the losses is sufficient (30-40%). During the last decades the losses of electric power in the networks of Ukraine were relatively stable and equaled about 10% of the supplied electricity. However, due to different reasons in recent years they grew up to 16%.

Availability of errors caused by current signals sources, leads to the significant differences of the measured electrical value, such as active power and electric energy from their real values in the high-voltage power networks. Reduction of these errors makes it possible to increase the measurement accuracy, which in its turn will result in more precise specification of bills for the consumed electricity, its quality, electricity losses in networks and to control more precisely the generators power at the power stations, which is of great importance within the energy market.

Error reduction of current measuring transformers is obtained by taking into consideration its metrology properties. Until now the errors of measuring transformers were estimated by their type of accuracy, which happened to be only the characteristic of networks. Application of the additional results on the initial and finished tests of each of transformers, that is represented in a specification, makes possible to decrease these limits.

It is known that the random component of measurement error can not be excluded from the results of this single measurement. The value of this random component is the exceptional theoretical limit, which can improve measurement accuracy.

It was proved that the characteristics of signals of current measuring transformer can be found from the low-voltage side that allows to find these characteristics in the production conditions. The method was developed and the scheme for measuring of signals characteristics of the current transformers from the low-voltage side, that can be applied in the production conditions for finding of error similar to real under real loading was presented. It is known also, that the most traditional is the systematic error compensation which can be carried out automatically by means of computer during its operation. But up to now it was not known what is the limit of possibility to carry out compensation of the systematic component of the error in the high-voltage sources of current sources.

Information, which proves that after compensation of the systematic error components of high-voltage current sources, the error of the presented information will go down approximately in 5 times. The limit of the

error decrease that is achieved after compensation of the systematic error component was found too. This value is limited by the possibilities of the metrology at the plant producer and equals about 0,05%.

Key words: signal, source signal current transformer current, error, model.

Постановка проблеми. Наявність похибок, зумовлених джерелами сигналів струму (ДСС), призводить до значної відмінності вимірюваних електричних величин, таких, як активна потужність та електроенергія, від дійсних їх значень у високовольтних мережах енергосистем. Зменшення цих похибок надає можливість підвищити точність вимірювань, що, в свою чергу, призведе до більш правильного визначення плати за спожиту електроенергію, якості електроенергії, втрат у мережах та до точнішого регулювання потужностей генераторів на електростанціях, що особливо важливо в умовах енергоринку.

Роль і значення втрат електроенергії в тарифоутворенні та розвитку енергосистеми бачимо з того, що у вартості передавання електроенергії вартість втрат має велику питому вагу (30–40%). Втрати електроенергії в мережах України упродовж останніх десятиліть були досить стабільними й становили близько 10% від обсягу відпущеної електроенергії [1, 2]. Проте в останні роки, внаслідок об'єктивних і суб'єктивних причин, вони зросли до 16% [1, 2].

Дана стаття присвячена оцінюванню величини остаточної похибки високовольтних ДСС, визначенню границі зниження похибки після компенсації систематичних складових.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема визначення похибок високовольтних ДСС та компенсації їх систематичних складових висвітлювалась у роботах [3, 4, 5]

В роботі [4] розроблено спосіб і наведено схему вимірювання характеристик джерел сигналів струму з низьковольтного боку, які можуть бути застосовані у виробничих умовах для визначення похибки, близької до фактичної. В роботі [5] наведено алгоритм автоматичної компенсації систематичної складової похибок ДСС. Але до сьогодні не було відомо, до якої межі є можливість провести компенсацію систематичної складової похибки у високовольтних ДСС.

Мета роботи. Визначити граничну межу зниження похибки високовольтних ДСС після компенсації систематичної складової похибок, тобто межу, до якої можна підвищувати точність вимірювань.

Постановка задачі. Вимірювання похибки $\delta \hat{I}_4$ й інших паспортних даних здійснюється на повірочній метрологічній установці заводу-виробника високовольтної апаратури згідно з диференціально-нульовим методом. При вимірюванні струмової похибки ДСС $\delta \hat{I}_i, i=1,2,3,4$ у результат вимірювання вноситься додаткова похибка δI_{0i} . Величина похибки δI_{0i} формується систематичною складовою похибки (струмова похибка зразкового ДСС) і випадковою складовою (струмова похибка приладу порівняння K507).

Відомо, що випадкову складову похибки вимірювання виключити із результату цього однократного вимірювання неможливо. Величина цієї випадкової складової є тією теоретичною границею, до якої можна підвищувати точність

вимірювань. При повірці ДСС із класом точності 1 [3] границею точності, до якої можна здійснити компенсацію, є межі $\pm 0.01(\pm 0.03)$ і т.д.

При сумісному розгляді меж дозволених похибок приладу порівняння К507 [6] та меж дозволених похибок зразкових трансформаторів [6] можна визначити, що при повірці ДСС із класом точності 0,2 і 0,5 (1,0) струмова похибка приладу порівняння в 5 разів (в 17 разів) менша, аніж похибка зразкового ДСС, і тому нею можна знехтувати. Таким чином, при вимірюванні струмової похибки ДСС $\delta I_i, i = 1, 2, 3, 4$ диференціально-нульовим методом у результаті вимірювання вноситься додаткова струмова похибка δI_{0i} , вона є систематичною і тому її потрібно додавати до результатів вимірювань, що й рекомендується робити в керівних документах при визначенні струмової похибки ДСС, що повіряється [6, 7].

$$\delta I_i = \delta \hat{I}_i + \delta I_{0i}, i = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

де $\delta \hat{I}_i$ – середнє арифметичне значення відліків по шкалі приладу порівняння, що отримані при збільшенні й зменшенні струму; δI_{0i} – струмова похибка зразкового ДСС.

На заводі-виробнику клас точності ДСС, що повіряється, визначають без урахування похибок зразкового ДСС. Тоді із (1) очевидно, що паспортні значення струмової похибки

$$\delta \hat{I}_i = \delta I_i - \delta I_{0i}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

відрізняються від своїх дійсних значень $\delta I_i, i = 1, 2, 3, 4$ на величину систематичної похибки зразкового ДСС.

Для ТС характерна виткова поправка, а вираз, що описує оцінку виткової поправки, має вигляд [8]

$$\hat{\delta} = \hat{\delta} I_4 + 2,7 \cdot 10^{-2} [z(0,25z_{2H})]^{0,6} \cdot \{ \Delta \psi_{I_4} y_1 \sin \alpha (0,25z_{2H}) + \hat{c}_{1\delta} \cos \alpha (0,25z_{2H}) \}. \quad (3)$$

Для аналізу співвідношення (3) в системі рівнянь (2) скористаємося

$$\delta \hat{I}_4 = \delta I_4 - \delta I_{04}. \quad (4)$$

Після врахування (4) в співвідношенні (3) можна зробити висновок про те, що це співвідношення з точки зору визначення оцінки виткової поправки аналогічно співвідношенню, що описує оцінку кутової похибки [8]. Тому оцінку виткової поправки доцільно визначати за формулою

$$\hat{\delta} = \delta - \delta_0, \quad (5)$$

де δ_0 – похибка визначення виткової поправки.

Шукане значення виткової поправки

$$\delta = \delta I_4 + \delta I_4^H. \quad (6)$$

Тут струмова похибка ТС без виткової поправки при $I_1 = 1, 2I_{1H}, z_2 = 0,25z_{2H}$

$$\delta I_4^H = -2,7 \cdot 10^{-2} [z(0,25z_{2H})]^{0,6} \{ \Delta \psi_{I_4} y_1 \sin \alpha (0,25z_{2H}) + c_{1\delta} \cos \alpha (0,25z_{2H}) \}, \quad (7)$$

де $c_{1\delta}$ – індивідуальний параметр ДСС;

$$c_{1\delta} = \left\{ y^2 \left\{ \Delta\psi_{14}^2 + \left[\Delta\psi_{14} \operatorname{ctg}\theta_2 - \frac{\lambda\Delta\psi_{1\lambda}}{\sin\theta_2} \right] \right\} - y_1^2 \Delta\psi_{1\lambda}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Окрім цього, можна показати, що похибка визначення виткової поправки δ_0 (5) визначається виразом

$$\delta_0 = \delta I_{04} + \frac{\Delta\theta_4}{\Delta\psi_{14}} \delta I_4^H. \quad (9)$$

Знайдемо вираз похибки визначення виткової поправки для випадку

$$\frac{\Delta\theta_4}{\Delta\psi_{14}} = \frac{\delta I_{o\delta 4}^H}{\delta I_4^H}, \quad (10)$$

де $I_{o\delta 4}^H$ – систематична складова похибки зразкового ТС без урахування компенсації, тобто без урахування величини виткової поправки $\delta_{o\delta}$ зразкового ТС, задовольняє рівняння

$$\delta_{o\delta} = \delta I_{04} + \delta I_{o\delta 4}^H. \quad (11)$$

Підстановка (10) в (9) призводить до

$$\delta_o = \delta_{o\delta}. \quad (12)$$

Таким чином, похибка визначення виткової поправки в розглянутому випадку дорівнює витковій поправці зразкового ТС.

Продовжимо аналіз оцінки струмової похибки, яка дається співвідношенням [8],

$$\delta \hat{I}(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = \hat{\delta} - 2,91 \cdot 10^{-2} \cdot c \cdot \lambda_2^{-0,4} [z(z_2)]^{0,6} \sin[\psi_A + \alpha(z_2)]. \quad (13)$$

Тут вже проаналізовано формування оцінки виткової поправки. Проаналізуємо тепер в (13) перший склад. Цей склад являє собою струмову похибку ТС без виткової поправки

$$\delta \hat{I}_4^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = -2,91 \cdot 10^{-2} \cdot c \cdot \lambda_2^{-0,4} [z(z_2)]^{0,6} \sin[\psi_A + \alpha(z_2)]. \quad (14)$$

Продовжимо аналіз цього співвідношення й розглянемо, як формується

$$A_I = \sin[\psi_A + \alpha(z_2)]. \quad (15)$$

Представимо A_I таким чином:

$$A_I = \sin \left\{ \left[\arcsin \frac{34,4 [\delta \hat{I}(\lambda_1 I_{1H}, z_{2H}) - \hat{\delta}] y_1}{c} \right] + \alpha(z_2) - \alpha(z_{2H}) \right\}. \quad (16)$$

Позначимо

$$x_{1I} = 34,4 \frac{\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H y_1}{c} \quad (17)$$

і

$$\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H = \delta I(\lambda_1 I_{1H}, z_{2H}) - \hat{\delta}. \quad (18)$$

Із урахуванням усіх позначень представимо вираз у фігурних дужках так:

$$B_I = \arcsin x_{1I} - \arccos x_2.$$

За допомогою довідника [9] подамо B_I у такій формі:

$$B_I = \arcsin \left\{ x_{1I} x_2 - \sqrt{(1-x_{1I}^2)(1-x_2^2)} \right\}. \quad (19)$$

Використаємо цей результат і запишемо співвідношення (16) таким чином:

$$A_I = x_{1I}x_2 - \sqrt{(1-x_{1I}^2)(1-x_2^2)}. \quad (20)$$

Підстановка (20) у співвідношення (14) призводить до

$$\delta \hat{I}_{(\lambda_2 I_{1H}, z_2)}^H = -2,91 \cdot 10^{-2} \cdot c \cdot \lambda_2^{-0,4} [z(z_2)]^{0,6} \cdot \left\{ x_{1I}x_2 - \sqrt{(1-x_{1I}^2)(1-x_2^2)} \right\} \quad (21)$$

Введемо c у фігурну дужку в (21), тут

$$c_{x_{1I}} = 34,4 y_1 \delta I_{\lambda 1}^H, \quad (22)$$

$$\hat{c}_{1I} = c \sqrt{1-x_{1I}^2}. \quad (23)$$

Із урахуванням (6)

$$\hat{c}_{1I} = \sqrt{c^2 - 1181 y_1^2 (\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H)^2}. \quad (24)$$

$$\hat{c}_{1I} = \left\{ y^2 \left[\Delta \psi_{I4}^2 + \left(\Delta \hat{\psi}_{I4} \operatorname{ctg} \theta_2 - \frac{\lambda \Delta \hat{\psi}_{I\lambda}}{\sin \theta_2} \right)^2 \right] - 1181 y_1^2 (\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (25)$$

З урахуванням вищевикладених співвідношень, запишемо вираз (23) в такій формі:

$$\delta \hat{I}_H (\lambda_2 I_{1H}, z_2) = -2,91 \cdot 10^{-2} \frac{[z(z_2)]^{0,6}}{\lambda_2^{0,4}} \left\{ \begin{array}{l} 34,4 y_1 x_2 \delta \hat{I}_{\lambda 1}^H - \\ \left[y^2 \left[\Delta \hat{\psi}_{I4}^2 + \left(\Delta \hat{\psi}_{I4} \operatorname{ctg} \theta_2 - \frac{\lambda \Delta \hat{\psi}_{I\lambda}}{\sin \theta_2} \right)^2 \right] - 1181 y_1^2 (\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \sin [\alpha(z_{2H}) - \alpha(z_2)] \end{array} \right\} \quad (26)$$

Бачимо, що (26) формується $\Delta \hat{\psi}_{I4}$, $\Delta \hat{\psi}_{I3}$ і $\Delta \hat{I}_{\lambda 1}^H$. Проведемо аналіз струмової похибки $\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H$.

$$\delta \hat{I}_{\lambda 1} = \delta \hat{I}_{\lambda 1}^H + \hat{\delta}. \quad (27)$$

Нехай $0,5 I_{1H} \leq I_1 \leq 1,2 I_{1H}$ і $I_1 = \lambda_1 I_{1H}$. В тому випадку $\delta \hat{I}_{\lambda 1}$ описується співвідношенням, яке можна записати

$$\delta \hat{I}_{\lambda 1} = \beta_3 \delta \hat{I}_3 + (1 - \beta_3) \delta \hat{I}_2, \quad (28)$$

де $\beta_3 = 1,42 c_\theta \left(\frac{\lambda_1}{0,2} \right)$.

Підстановкою $\delta \hat{I}_2$ і $\delta \hat{I}_3$, котрі визначені (2) у співвідношенні (28), отримаємо

$$\delta \hat{I}_{\lambda 1} = [\beta_3 \delta I_3 + (1 - \beta_3) \delta I_2] - [\beta_3 \delta I_{03} + (1 - \beta_3) \delta I_{02}]. \quad (29)$$

Тут доданок, що вміщений у перші квадратні дужки,

$$\delta I_{\lambda 1} = \beta_3 \delta I_3 + (1 - \beta_3) \delta I_2 \quad (30)$$

– це шукана похибка, а доданок, поміщений у другі квадратні дужки, – це похибки, яка формується струмовими похибками зразкового ТС

$$\delta I_{0\lambda 1} = \beta_3 \delta I_{03} + (1 - \beta_3) \delta I_{02}. \quad (31)$$

Оскільки в повірочній метрологічній установці заводу-виробника використовується зразковий вимірювальний ТС, що має клас точності 0,05, межі допустимої струмової похибки зразкового ТС обмежені величиною $\delta_{OTT} = 0,05\%$. Тому зі співвідношення (30) випливає

$$-\delta_{OTT} \leq \delta I_{0\lambda 1} \leq \delta_{OTT}. \quad (32)$$

Нехай $I_1 = \lambda_1 I_{1H}$ і $0,2 \leq \lambda_1 < 0,5$. Тут доводиться, що похибка δI_{05} визначення значення, близького до фактичного,

$$\delta I_5 = 0,431\delta I_2 + 0,569\delta I_3, \quad (33)$$

задовольняє

$$-\delta_{OTT} \leq \delta I_{05} \leq \delta_{OTT}. \quad (34)$$

Похибка визначення $\delta I_{\lambda 1}$ описується

$$\delta I_{0\lambda 1} = \beta^1 \delta I_{02} + \beta^2 \delta I_{05}, \quad (35)$$

Нехай $I_1 = \lambda_1 I_{1H}$, де $0,05 \leq \lambda < 0,2$. Тут доводиться, що похибка визначення значення, близького до фактичного, $\delta I_{\lambda 1}$ описується

$$\delta I_{0\lambda 1} = \beta_1 \delta I_{01} + \beta_2 \delta I_{02}. \quad (36)$$

Таким чином, показано, що

$$\delta \hat{I}_{\lambda 1} = \delta I_{\lambda 1} - \delta I_{0\lambda 1}, \quad (37)$$

де

$$-\delta_{OTT} \leq \delta I_{0\lambda 1} \leq \delta_{OTT}. \quad (38)$$

Із урахуванням отриманих результатів, розглянемо, як формується струмова похибка $\delta \hat{I}^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$ (26). Додатково розглянемо формування похибки при визначенні \hat{c}_{1I} (25). Перепишемо (25) таким чином:

$$\hat{c}_{1I} = \left\{ \begin{array}{l} y^2 \left[(\Delta \psi_{14} - \Delta \theta_4)^2 + \left[(\Delta \psi_{14} - \Delta \theta_4) \operatorname{ctg} \theta_2 - \frac{\lambda}{\sin \theta_2} (\Delta \psi_{1\lambda} - \Delta \theta_\lambda) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ -1181 y_1^2 (\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H)^2 \end{array} \right\}, \quad (39)$$

де $\hat{\delta}$ – визначена (5), (12). Тут $\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H$ дано (18), а оцінка описується (27) і (37) – $\delta \hat{I}(\lambda_1 I_{1H}, z_{2H})$.

Шляхом підстановки (5), (12), (27), (37) отримаємо

$$\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H = \delta I_{\lambda 1}^H - \delta I_{0\lambda 1}^H, \quad (40)$$

де $\delta I_{\lambda 1}^H$ – істинне значення струмової похибки повірочного ТС без виткової поправки при струмі $I_1 = \lambda_1 I_{1H}$, а $\delta I_{0\lambda 1}^H$ – струмова похибка зразкового ТС при тому ж струмі.

Позначимо значення

$$c_{1I} = \left\{ y^2 \left[\Delta \psi_{14}^2 + \left(\Delta \psi_{14} \operatorname{ctg} \theta_2 - \frac{\lambda \Delta \psi_{1\lambda}}{\sin \theta_2} \right)^2 \right] - 1181 y_1^2 (\delta I_{\lambda 1}^H)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (41)$$

і перепишемо у такій формі:

$$\hat{c}_{1I} = c_{1I} \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{2}{c_{1I}^2} \left\{ y^2 \left[\Delta\psi_{14}\Delta\theta_4 + \left(\Delta\psi_{14}\text{ctg}\theta_2 - \frac{\lambda\Delta\psi_{1\lambda}}{\sin\theta_2} \right) \cdot \left(\Delta\theta_4\text{ctg}\theta_2 - \frac{\lambda\Delta\theta_\lambda}{\sin\theta_2} \right) - 1181y_1^2\delta I_{\lambda 1}^H\delta I_{0\lambda 1}^H \right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{c_{1I}^2} \left\{ y^2 \left[\Delta\theta_4^2 + \left(\Delta\theta_4\text{ctg}\theta_2 - \frac{\lambda\Delta\theta_\lambda}{\sin\theta_2} \right)^2 \right] - 1181y_1^2(\delta I_{0\lambda 1}^H)^2 \right\} \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (42)$$

Позначимо

$$\Delta c_{1I} = y^2 \left[\Delta\psi_{14}\Delta\theta_4 + \left(\Delta\psi_{14}\text{ctg}\theta_2 - \frac{\lambda\Delta\psi_{1\lambda}}{\sin\theta_2} \right) \left(\Delta\theta_4\text{ctg}\theta_2 - \frac{\lambda\Delta\theta_\lambda}{\sin\theta_2} \right) \right] - 1181y_1^2\delta I_{\lambda 1}^H\delta I_{0\lambda 1}^H. \quad (43)$$

У співвідношенні (42) третій доданок, чисельник якого поміщений у внутрішню фігурну дужку, значно менший, аніж другий доданок $\frac{2\Delta c_{1I}}{c_{1I}^2}$ і тому третім доданком можна знехтувати. В цьому випадку (42) матиме вигляд

$$\hat{c}_{1I} = c_{1I} \sqrt{1 - 2\Delta c_{1I} / c_{1I}} \quad (44)$$

або

$$\hat{c}_{1I} = c_{1I} \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta c_{1I}}{c_{1I}^2} \right)^2 - \frac{\Delta c_{1I}^2}{c_{1I}^4}}. \quad (45)$$

У наступному співвідношенні доданком $\frac{\Delta c_{1I}^2}{c_{1I}^4}$ через мале значення можна знехтувати і записати

$$\hat{c}_{1I} = c_{1I} \left(1 - \frac{\Delta c_{1I}}{c_{1I}^2} \right). \quad (46)$$

Подальший аналіз формування струмової похибки $\delta \hat{I}(\lambda_1 I_{1H}, z_2)$ проведемо, розглянувши наступний випадок. Нехай виконується

$$\frac{\delta I_{\lambda 1}^H}{\Delta\psi_{14}} = \frac{\delta I_{0\lambda 1}^H}{\Delta\theta_4}, \quad (47)$$

тоді можна представити (46) в такому вигляді:

$$\hat{c}_{1I} = c_{1I} \left(1 - \frac{\Delta\theta_4}{\Delta\psi_{14}} \right). \quad (48)$$

Раніше \hat{c}_{1I} визначалося (23). Саме у формі (23) легко помітити, як \hat{c}_{1I} бере участь у формуванні $\delta \hat{I}_H(\lambda_2 I_{2H}, z_2)$ (21). Використання у (21) співвідношень (23), (18) і замість (24) співвідношення (48) дозволяє записати (21) у такому вигляді:

$$\delta \hat{I}^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = -2,91 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{[z(z_2)]^{0,6}}{\lambda_2^{0,4}} \left\{ \begin{aligned} & 34,4y_1x_2\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H - c_{1I} \left(1 - \frac{\Delta\theta_4}{\Delta\psi_{14}} \right) \times \\ & \times \sin[\alpha(z_{2H}) - \alpha(z_2)] \end{aligned} \right\}. \quad (49)$$

Підставимо в (49) $\delta \hat{I}_{\lambda 1}^H$ у формі (40), тоді

$$\begin{aligned} & \delta \hat{I}^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = \\ & = -2,91 \cdot 10^{-2} \frac{[z(z_2)]^{0,6}}{\lambda_2^{0,4}} \left\{ \begin{aligned} & 34,4 y_1 x_2 \delta I_{\lambda 1}^H - c_{1I} \sin[\alpha(z_{2H}) - \alpha(z_2)] - \\ & \left[34,4 y_1 x_2 \delta I_{0\lambda 1}^H - c_{1I} \frac{\Delta \theta_4}{\Delta \psi_{14}} \sin[\alpha(z_{2H}) - \alpha(z_2)] \right] - \end{aligned} \right\}. \quad (50) \end{aligned}$$

Позначимо в (50) істинне значення

$$\delta I^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = -2,91 \cdot 10^{-2} \frac{[z(z_2)]^{0,6}}{\lambda_2^{0,4}} \left\{ 34,4 y_1 x_2 \delta I_{\lambda 1}^H - c_{1I} \sin[\alpha(z_{2H}) - \alpha(z_2)] \right\}. \quad (51)$$

Також позначимо похибку визначення $\delta I^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$ таким чином:

$$\delta I_{0\lambda z}^H = -2,91 \cdot 10^{-2} \frac{[z(z_2)]^{0,6}}{\lambda_2^{0,4}} \left\{ 34,4 y_1 x_2 \delta I_{0\lambda 1}^H - c_{1I} \frac{\Delta \theta_4}{\Delta \psi_{14}} \sin[\alpha(z_{2H}) - \alpha(z_2)] \right\}. \quad (52)$$

Тоді

$$\delta \hat{I}^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = \delta I^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2) - \delta I_{0\lambda z}^H. \quad (53)$$

Врахуємо в (52) умову (47) і співвідношення (51) і остаточно отримаємо

$$\delta I_{0\lambda z}^H = \frac{\Delta \theta_4}{\Delta \psi_{14}} \delta I^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2). \quad (54)$$

Звідси бачимо, що похибка $\delta I_{0\lambda z}^H$ є мультиплікативною. Більш важливо проаналізувати залишкову струмову похибку

$$\delta I_{0\lambda z} = \delta_{0\delta} + \delta I_{0\lambda z}^H. \quad (55)$$

Проведемо такий аналіз у випадку, коли

$$\frac{\delta_{0\delta}}{\delta} = \frac{\Delta \theta_4}{\Delta \psi_{14}}. \quad (56)$$

Із урахуванням (56) і (54) представимо (55) такою формулою:

$$\delta I_{0\lambda z} = \frac{\Delta \theta_4}{\Delta \psi_{14}} \delta I(\lambda_2 I_{1H}, z_2). \quad (57)$$

Згідно з $\Delta \psi_{14} = K \Delta \theta_4$ існує таке K , яке призводить (57) до вигляду

$$\delta I_{0\lambda z} \leq 0,1 \delta I(\lambda_2 I_{1H}, z_2). \quad (58)$$

Оскільки струмова похибка $\delta I(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$ має межі $\pm 0,75\%$ [3], то із (58) випливає, що остаточна струмова похибка обмежена значеннями $\pm 0,075$ при струмові $I_1 = 0,05 I_{1H}$.

Оцінка величини остаточної похибки джерела сигналу струму. Покажемо, що величина остаточної похибки вимірювання потужності, що вноситься вимірювальними трансформаторами струму, не перевищує 0,14%.

Знайдемо оцінку струмової похибки ДСС

$$\delta \hat{I}(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = \delta \hat{I}^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2) + \delta. \quad (59)$$

За допомогою (53), (12) і (5) перетворимо цей вираз до такого вигляду:

$$\delta \hat{I}(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = \delta I^H(\lambda_2 I_{1H}, z_2) - \delta I_{0\lambda z}^H + \delta - \delta_{0\delta}.$$

Врахуємо тут (55) і отримаємо

$$\delta \hat{I}(\lambda_2 I_{1H}, z_2) = \delta I(\lambda_2 I_{1H}, z_2) - \delta I_{0\lambda z}. \quad (60)$$

Введені поправки $\delta \hat{I}(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$ і поправки $\Delta \hat{\psi}(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$ у результаті вимірювання потужності за допомогою

$$\check{P}_1 = \frac{\hat{P}_1}{1 + 0,01\delta \hat{I} + 0,291 \cdot 10^{-3} \Delta \hat{\psi}_I \operatorname{tg} \hat{\psi}_1}. \quad (61)$$

дає оцінку \check{P}_1 , яка відрізняється від близького до фактичного значення

$$P_1 = \frac{\hat{P}_1}{1 + 0,01(\delta I + 0,0291 \Delta \psi_I \operatorname{tg} \psi_1)} \quad (62)$$

У цьому співвідношенні й далі в цьому розділі використовуються спрощення $\delta I = \delta I(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$, $\Delta \psi_I = \Delta \psi_I(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$, $\delta \hat{I} = \delta \hat{I}(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$, $\Delta \hat{\psi}_I = \Delta \hat{\psi}_I(\lambda_2 I_{1H}, z_2)$. Вираз, що описує P_1 , можна перетворити у формулу

$$P_1 = \frac{\hat{P}_1}{1 + 0,01(\delta \hat{I} + 0,0291 \Delta \hat{\psi}_I \operatorname{tg} \hat{\psi}_1)} \cdot \frac{1 + 0,01(\delta I + 0,0291 \Delta \psi_I \operatorname{tg} \psi_1)}{1 + 0,01(\delta I + 0,0291 \Delta \psi_I \operatorname{tg} \psi_1)}. \quad (63)$$

Другий множник у цьому виразі з урахуванням (60) дорівнює

$$k_I = \frac{1 + 0,01(\delta \hat{I} + 0,0291 \Delta \hat{\psi}_I \operatorname{tg} \hat{\psi}_1)}{1 + 0,01[(\delta \hat{I} + \delta I_{0\lambda z}) + 2,91 \cdot 10^{-2} (\Delta \hat{\psi}_I + \Delta \theta_{\lambda z}) \operatorname{tg} \psi_1]}. \quad (64)$$

Якщо $\operatorname{tg} \psi_1 \approx \operatorname{tg} \hat{\psi}_1$, то

$$k_I = \left[1 + 10^{-2} \frac{\delta I_{0\lambda z} + 2,91 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta \theta_{\lambda z} \operatorname{tg} \hat{\psi}_1}{1 + 10^{-2} (\delta \hat{I} + 2,91 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta \hat{\psi}_I \cdot \operatorname{tg} \hat{\psi}_1)} \right]^{-1}. \quad (65)$$

Оскільки $\delta \hat{I} \ll 100$ і $0,0291 \Delta \hat{\psi}_I \operatorname{tg} \hat{\psi}_1 \ll 100$ при $\operatorname{tg} \hat{\psi}_1 > 0,1$, то

$$k_I = \frac{1}{1 + 0,01(\delta I_{0\lambda z} + 2,91 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta \theta_{\lambda z} \operatorname{tg} \hat{\psi}_1)}. \quad (66)$$

Із урахуванням цього результату і з урахуванням (61) запишемо P_1 таким чином

$$P_1 = \frac{\check{P}_1}{1 + 10^{-2} (\delta I_{0\lambda z} + 2,91 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta \theta_{\lambda z} \operatorname{tg} \hat{\psi}_1)}. \quad (67)$$

Звідси випливає, що остаточна похибка вимірювання потужності, що вноситься ТС після введення поправки, рівна

$$\delta P_{I0} = \delta I_{0\lambda z} + 2,91 \cdot 10^{-2} \Delta \theta_{\lambda z} \operatorname{tg} \hat{\psi}_1, \% \quad (68)$$

Ця похибка визначається похибкою зразкового ТС повірочної вимірювальної установки заводу виробника і при $\cos \hat{\psi}_1 = 0,8$ складає

$$\delta P_{I0} = 0,075 + 0,0291 \cdot 3,0 \cdot 0,75 = 0,14 \%$$

Таким чином, остаточна похибка вимірювання потужності, що вноситься вимірювальним трансформатором струму, складає 0,14%.

Висновки. Доведено, що після компенсації систематичних складових похибки високовольтних джерел сигналів струму, похибка представленої інформації знизиться приблизно в 5 разів також. Визначено межу зниження похибки, яка досягається після компенсації систематичної складової похибки. Ця величина обмежується можливостями метрологічного забезпечення на заводі-виробнику і являє собою похибку порядку 0,05%.

Conclusions. It is proved that after compensation of systematic error components of high-current sources of signals, the error of the information will drop about 5 times as defined by the limit of error reduction, which is achieved after compensation of systematic error component. This value is limited possibilities of metrological support for the manufacturer and is an error of order 0.05%.

Список використаної літератури

1. Аналіз роботи енергопостачальних компаній щодо розрахунків споживачів за електроенергію в січні 2006 р. та зниження ТВЕ у 2005 р. // Новини енергетики. – 2006. – №2. – С. 6–8.
2. Энергетическая политика Украины. – 2005. – №12(64). – С. 17–18.
3. Рудевіч, Н.М. Зменшення похибок, обумовлених високовольтними трансформаторами струму та напруги, приєднанням до їхніх вторинних кіл компенсувальних пристроїв [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Н.М. Рудевіч. – Харків, 2009. – 20 с.
4. Євтух, П. Структура алгоритмів автоматичної компенсації систематичних похибок масштабуючих вимірювальних перетворювачів [Текст] / П. Євтух, Н. Куземко, С. Бабюк // Вісник ТДТУ. 2010. – Т. 15, №1. – С. 163–170.
5. Євтух, П. Оцінки похибок джерел сигналів електроенергетичних систем за навантаженням [Текст] / П. Євтух, С. Бабюк // Вісник ТНТУ. – 2011. – Том 19, № 4. – С. 178–185.
6. ДСТУ 6097:2009 Метрологія. Трансформатори струму. Методика повірки (ГОСТ 8.217-2003, MOD) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ampreg-energo.ru/lib/8.217-2003.pdf>.
7. Любимов, Л.И. Поверка средств электрических измерений. Справочная книга [Текст] / Л.И. Любимов, И.Д. Форсилова, Е.З. Шапиро. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.
8. Автоматична компенсація систематичних похибок вимірювальних трансформаторів струму [Текст]: матеріали Міжн. науково-техн. конф. “Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика”, (Кременчук, 18–20 трав. 2011 р.). – К.: Кременчуцький нац. ун-т ім. М. Остроградського, 2011. – 46 с.
9. Справочник по специальным функциям [Текст]; под ред. М. Абрамовича, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 830 с.

Отримано 18.04.2012