

УДК 621.314.213.08

П.Євтух, докт. техн. наук; Н.Куземко, канд. техн. наук; С.Бабюк

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛІ ПОХИБОК ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

Розроблено моделі амплітудної та кутової похибок для високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги. Такі моделі дають змогу побудувати відповідні характеристики точності розрахунковим шляхом, використовуючи паспортні дані трансформаторів напруги. Спосіб використання цих моделей пропонується для підвищення точності засобів вимірювання потужності та обліку електроенергії, а також оцінювання точності систем релейного захисту. Показано можливість визначення систематичних складових цих похибок за допомогою запропонованих моделей для практичних випадків

Ключові слова: високовольтний вимірювальний перетворювач, трансформатор напруги, похибка, автоматична компенсація, модель.

P.Yevtoch, N.Kuzemko, S.Babiyk

High voltage measuring transformers error models

There have been developed models of amplitude and phase error for high voltage measuring transformers. Such models give a possibility to simulate corresponding characteristics of accuracy by calculation from registered technical data of voltage transformers. These models are suggested to enhance accuracy of power measurement devices, power consumption accounting and relay failure protection systems precision estimate. There has been shown possibility for deviation systematic constituent definition of these errors with the help of suggested models for actual cases.

Key words: high voltage measuring converter, voltage transformer, error, automatic compensation, model.

Умовні позначення

δU - приведена похибка вимірювального трансформатора напруги;

$U_{1н}$ - номінальна напруга на високовольтній обмотці трансформатора;

$S_{2н}$ - номінальна потужність навантаження у низьковольтній обмотці трансформатора;

Z_2 - опір навантаження у низьковольтній обмотці трансформатора;

$Z_{2н}$ - номінальний опір навантаження у низьковольтній обмотці трансформатора.

1. Вступ. На точність систем вимірювання потужності та обліку електроенергії у високовольтних (ВВ) мережах суттєво впливають похибки первинних вимірювальних перетворювачів, зокрема похибки високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) [1,2,3,4,5]. Дослідження показали, що їх домінуючими складовими є систематичні складові похибки по напрузі та кутової похибки [6], які за величиною значно перевищують випадкові складові, саме тому на систематичні складові похибок необхідно звернути особливу увагу. На даний час немає спеціальних пристроїв для визначення систематичних складових цих похибок в умовах пуско-налагоджувальних робіт у системах, де застосовуються вимірювальні ТН, що створює певні труднощі при пуску і подальшій експлуатації систем вимірювання потужності та обліку електроенергії. Однак дослідження авторів показали, що вплив систематичних складових похибок на результати вимірювань можна суттєво зменшити, застосувавши відповідні поправки, і, таким чином, підвищити точність систем вимірювання

потужності та обліку електроенергії. Для цього необхідно застосувати похибки по напрузі та кутові похибки, моделі яких подані в подальшому матеріалі.

Підхід авторів статті до вирішення цієї науково-технічної задачі ґрунтується на експериментально встановленому факті, що характеристики похибок по напрузі (амплітудної) та кутової похибки мають лінійний характер в залежності від факторів впливу, що підтверджується типовими характеристиками, поданими на рис.1. Типові характеристики похибок по напрузі інших високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги при різних значеннях параметрів впливу принципово не відрізняються від поданих на рис.1.

2.Постановка задачі. Процедура компенсації систематичних складових похибок по напрузі та кутових похибок будується шляхом використання моделі похибок вимірювальних ТН, поданої в подальшому матеріалі. У даній статті пропонуються моделі похибки по напрузі та кутової похибки високовольтного вимірювального ТН, у варіанті, не тільки придатному для визначення систематичних складових, а також і для оцінювання ефекту від застосування розроблених моделей. Дослідження показали, що підґрунтям для побудови таких моделей доцільно використовувати паспортні дані

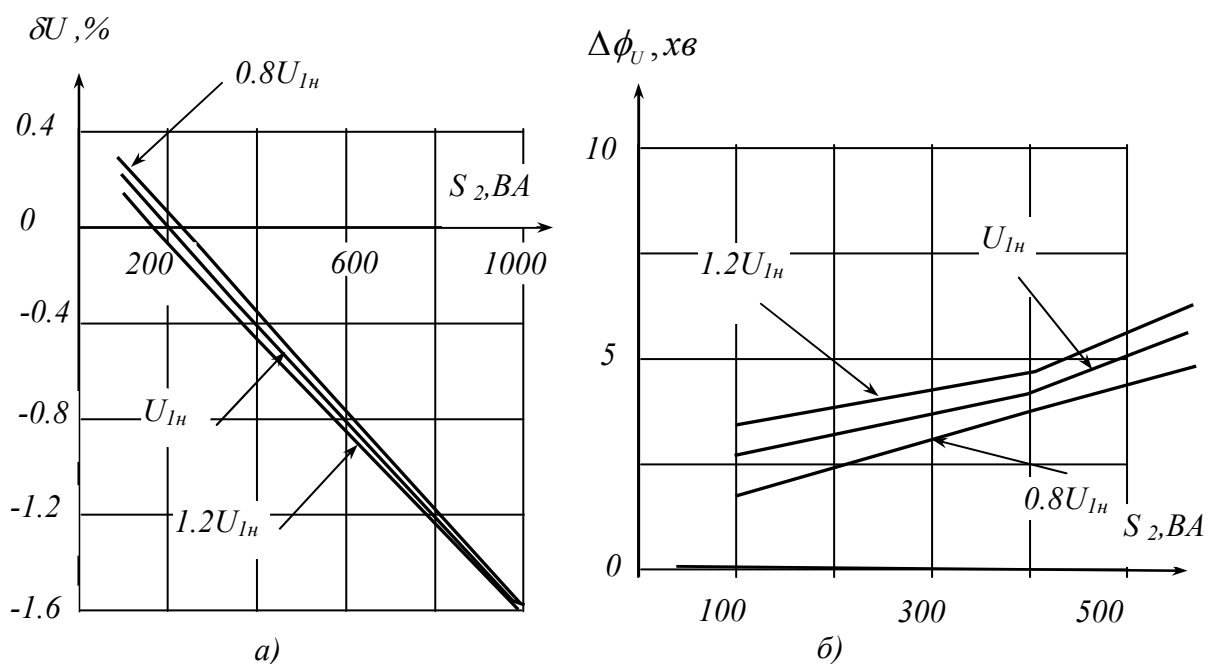


Рисунок 1 – Типові характеристики амплітудної (а) та кутової (б) похибок ВВ вимірювальних ТН

конкретних ТН, отримані на високоточній апаратурі заводу-виробника цих вимірювальних засобів [7].

3.Модель похибки по напрузі вимірювальних ТН. Приведену похибку по напрузі високовольтного вимірювального ТН δU , згідно з загальноприйнятим визначенням, можна записати виразом:

$$\delta U(\%) = \frac{\hat{U}_1 - U_1}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де U_1 - значення напруги на високовольтній обмотці ТН,

\hat{U}_1 - виміряне значення цієї напруги на виході низьковольтної обмотки.

Вираз (1) можна представити у вигляді виразу

$$U_1 = \frac{\hat{U}_1}{1 + 0.01 \cdot \delta U} \quad (2)$$

або у вигляді ряду

$$U_1 = \hat{U}_1 (1 + 0.01 \cdot \delta U), \quad (3)$$

у якому ми знехтували членами ряду другої та вищих степенів.

Режим експлуатації високовольтних ТН, при якому нормуються їх параметри, знаходиться в межах

$$0.8U_{1н} \leq U_1 \leq 1.2U_{1н}, \quad 0.25S_{2н} \leq S_2 \leq S_{2н},$$

де $U_{1н}, S_{2н}$ - відповідно номінальні значення напруги у високовольтній обмотці і споживаної повної потужності у низьковольтній обмотці. У цих межах характеристики похибок вимірювального ТН можна вважати практично лінійними. Прикладами таких характеристик можуть бути експериментальні залежності, зняті для конкретного ТН типу НКФ110, які зображені на рис.2.

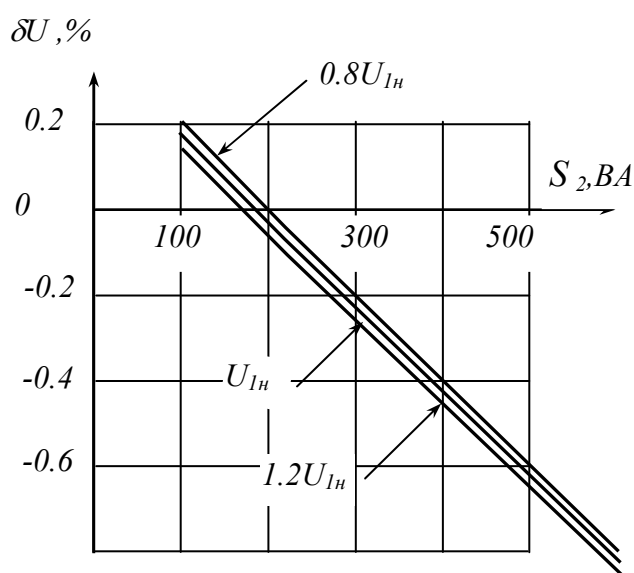


Рисунок 2 – Типові характеристики амплітудної похибки ВВ вимірювального ТН

трьох її точок, що не лежать на одній прямій. Координати цих трьох точок визначаються відповідними значеннями похибок для кожного з нормованих режимів експлуатації трансформатора. Враховуючи це, рівняння площини у координатній формі матиме вигляд:

$$\begin{vmatrix} U_1 - 0.8U_{1н} & 0 & 0.4U_{1н} \\ S_2 - 0.25S_{2н} & 0.75S_{2н} & 0 \\ \delta\hat{U} - \delta\hat{U}_1 & \delta\hat{U}_2 - \delta\hat{U}_1 & \delta\hat{U}_3 - \delta\hat{U}_1 \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

де

$$\delta\hat{U}_1 = \delta\hat{U}(0.8U_{1н}, 0.25S_{2н}),$$

$$\delta\hat{U}_2 = \delta\hat{U}(0.8U_{1н}, S_{2н}),$$

$$\delta\hat{U}_3 = \delta\hat{U}(1.2U_{1н}, 0.25S_{2н}) -$$

похибки нормованих режимів експлуатації ТН, що взяті з паспортних даних чи результатів перевірки трансформатора.

Після необхідних перетворень, формули для коефіцієнтів a, c, g можна записати у вигляді:

$$a = \frac{4}{3S_{2н}}(\delta\hat{U}_2 - \delta\hat{U}_1),$$

$$c = \frac{2.5}{U_{1н}}(\delta\hat{U}_3 - \delta\hat{U}_1),$$

$$g = 3.33\delta\hat{U}_1 - 0.33\delta\hat{U}_2 - 2\delta\hat{U}_3. \quad (6)$$

Якщо формулу для $\delta\hat{U}$ (4) підставити у вираз (2), врахувавши при цьому, що

$$\delta\hat{U} = aS_2 + cU_1 + g \approx aS_2 + c\hat{U}_1 + g, \quad (7)$$

а U мало відрізняється від \hat{U} , а значення c також мале, то вираз (3) матиме вигляд:

$$U_1 = \hat{U}_1 [1 - 0.01(aS_2 + c\hat{U}_1 + g)]. \quad (8)$$

Вираз

$$\delta\hat{U} = aS_2 + c\hat{U}_1 + g$$

є моделлю похибки вимірювального ТН, яка придатна для розв'язання поставленої задачі. Застосування числового значення цього виразу у вигляді поправки до формули (8) дає змогу отримати скоректоване значення вимірюваної величини на виході ТН. Перевага такого підходу полягає в тому, що, застосовуючи відомі числові значення, без додаткових вимірювальних експериментів, для визначення коефіцієнтів a, c, g у формулі для моделі похибки (4) можна використати дані чергової повірки ТН або значення похибок, записаних у паспортних даних на заводі-виробнику.

Приклад графічного визначення похибки по напрузі показаний на рис.3а,б. На рис. 3а показано залежності похибки δU від відношення напруги високовольтної обмотки до номінального значення цієї напруги $U_1/U_{1н}$ при двох різних значеннях опору навантаження вторинної обмотки $Z_2 = 0.25Z_{2н}$ та $Z_2 = Z_{2н}$ ($Z_{2н}$ - номінальне значення опору вторинної обмотки), що отримані з паспортних даних трансформатора.

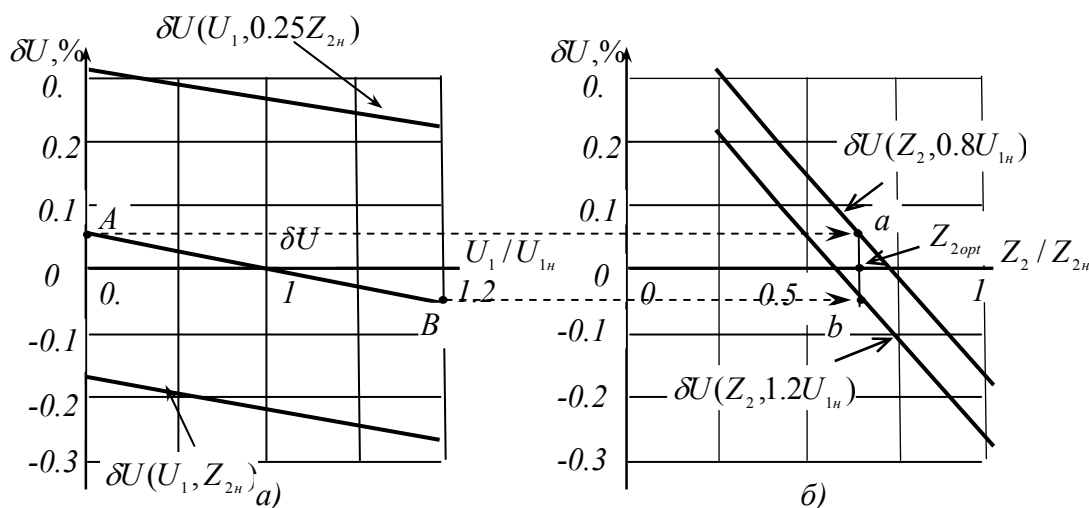


Рисунок 3 – Вибір режиму роботи ТН з мінімальною похибкою по напрузі

На рис.3б показано аналогічні залежності похибки δU від зміни опору навантаження трансформатора – від відношення опору навантаження вторинної обмотки до номінального значення цього опору $Z_2/Z_{2н}$ при двох різних значеннях напруги у високовольтній обмотці $U_1 = 0.8U_{1н}$ та $U_1 = 1.2U_{1н}$. З рисунків видно, що мінімальне значення похибки δU при номінальній напрузі високовольтної обмотки буде при значенні опору навантаження $Z_{2opt} = 0.7Z_{2н}$. Тому, вибравши саме такий режим роботи ТН, ми мінімізуємо похибку трансформатора по напрузі. Аналогічно можна знайти Z_{2opt} при інших напругах експлуатації ТН [8].

4. Модель кутової похибки вимірювальних ТН. Модель кутової похибки високовольтних вимірювальних ТН також базується на основі використання експериментально встановлених фактів. На рис.4а зображена експериментально отримана залежність характеристики кутової похибки $\Delta\phi_U$ високовольтного вимірювального ТН від зміни навантаження у низьковольтній обмотці. Така характеристика, як це встановлено експериментально, є типовою для високовольтних

ТН. На рис.4б зображена залежність характеристики кутової похибки $\Delta\phi_U$ високовольтного вимірювального ТН від впливу відхилень напруги у високовольтній

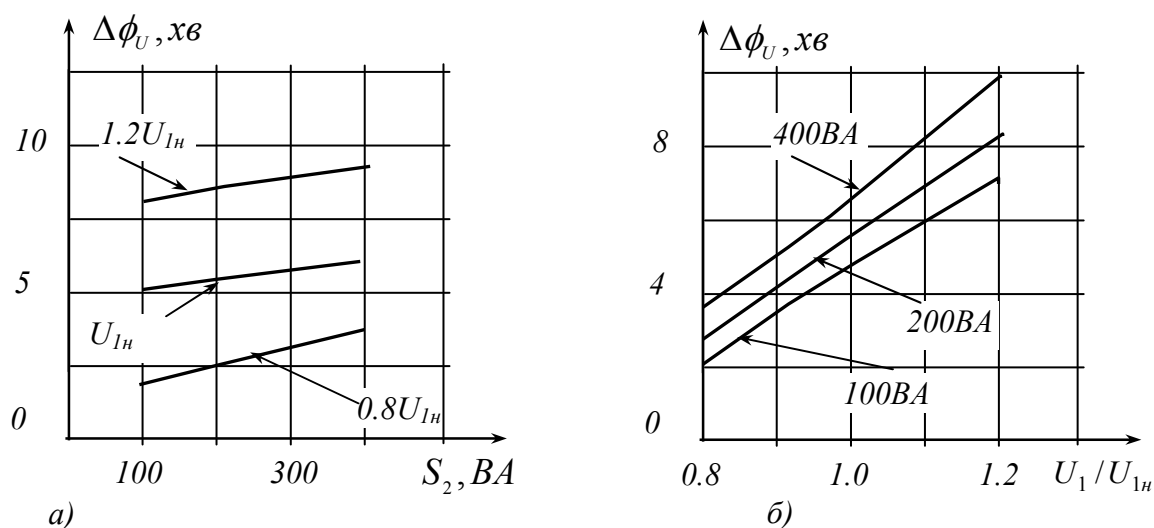


Рисунок 4 – Залежності кутової похибки $\Delta\phi_U$ від зміни навантаження у низьковольтній обмотці (а) та від впливу відхилень напруги у високовольтній обмотці від номінального значення (б)

обмотці від номінального значення. Ці залежності практично лінійні. Аналогічні залежності можна отримати для кожного вимірювального ТН, користуючись результатами його останньої перевірки або його паспортними даними [9]. Щодо значень кутової похибки $\Delta\hat{\phi}_U$, поданих у паспортних даних, то їх отримують за допомогою високоточної випробувально-повірочної установки заводу-виробника цих вимірювальних засобів. Абсолютні значення кутових похибок ТН $\Delta\hat{\phi}_U$, взяті з паспортних даних або отримані експериментально при останній перевірці трансформатора, позначимо $\Delta\hat{\phi}_{U1}$, $\Delta\hat{\phi}_{U2}$, $\Delta\hat{\phi}_{U3}$ для кожного із значень напруги U_1 у високовольтній обмотці при нормованих значеннях навантажень S_2 у низьковольтній обмотці. Всі значення цих похибок подаються при нормованому коефіцієнті потужності у низьковольтній обмотці $\cos\varphi_2 = 0.8$. На величину кутової похибки одночасно впливають зміна напруги у високовольтній обмотці та зміна навантаження у низьковольтній обмотці. Характер цих залежностей є лінійним, тому, аналогічно, як і для похибки по напрузі, характеристику кутової похибки можна подати рівнянням площини як функцію цих параметрів $\Delta\hat{\phi}_U(U_1, S_2)$ у вигляді:

$$\Delta\hat{\phi}_U = a_U S_2 + c_U U_1 + g_U, \quad (9)$$

де $\Delta\hat{\phi}_U$ - сумарна кутова похибка, a_U, c_U, g_U - коефіцієнти, які визначаються з паспортних даних кожного конкретного ТН. Значення похибок нормуються для чотирьох точок характеристики точності вимірювального ТН, хоча площина (9) повністю визначається трьома точками.

У координатній формі рівняння площини (9) можна записати так:

$$\begin{vmatrix} U_1 - 0.8U_{1n} & 0 & 0.4U_{1n} \\ S_2 - 0.25S_{2n} & 0.75S_{2n} & 0 \\ \Delta\hat{\phi}_U - \Delta\hat{\phi}_{U1} & \Delta\hat{\phi}_{U2} - \Delta\hat{\phi}_{U1} & \Delta\hat{\phi}_{U3} - \Delta\hat{\phi}_{U1} \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

де

$$\Delta\hat{\phi}_{U1} = \Delta\hat{\phi}_U(0.8U_{1n}, 0.25S_{2n}),$$

$$\Delta\hat{\phi}_{U_2} = \Delta\hat{\phi}_U(0.8U_{1н}, S_{2н}),$$

$$\Delta\hat{\phi}_{U_3} = \Delta\hat{\phi}_U(1.2U_{1н}, 0.25S_{2н}) -$$

похибки нормованих режимів експлуатації ТН, що взяті з паспортних даних чи результатів повірки трансформатора.

Після необхідних перетворень формули для коефіцієнтів a_U, c_U, g_U можна записати у вигляді:

$$a_U = \frac{1.333}{S_{2н}}(\Delta\hat{\phi}_{U_2} - \Delta\hat{\phi}_{U_1}), \quad (11)$$

$$c_U = \frac{2.5}{U_{1н}}(\Delta\hat{\phi}_{U_3} - \Delta\hat{\phi}_{U_1}), \quad (12)$$

$$g_U = 3.333\Delta\hat{\phi}_{U_1} - 0.33\Delta\hat{\phi}_{U_2} - 2\Delta\hat{\phi}_{U_3}, \quad (13)$$

Підставивши вирази (11), (12), (13) у рівняння (9), отримаємо модель кутової похибки вимірювального ТН у вигляді:

$$\Delta\hat{\phi}_U = \frac{1.333}{S_{2н}}(\Delta\hat{\phi}_{U_2} - \Delta\hat{\phi}_{U_1})S_2 + \frac{2.5}{U_{1н}}(\Delta\hat{\phi}_{U_3} - \Delta\hat{\phi}_{U_1})U_1 + 3.333\Delta\hat{\phi}_{U_1} - 0.33\Delta\hat{\phi}_{U_2} - 2\Delta\hat{\phi}_{U_3}. \quad (14)$$

Модель (14) дає змогу визначити систематичну складову кутової похибки $\Delta\hat{\phi}_U$, враховуючи особливості апаратурної реалізації установки.

Очевидно, що значення сумарної похибки повірочної установки формується зі суми значень похибки приладу порівняння та значень похибки зразкового ТН. Проте похибка приладу порівняння є випадковою, а похибка зразкового ТН – систематичною, що полегшує визначення систематичної похибки як домінуючої для цих вимірювальних приладів.

При повірці ТН з класами точності 0.2, 0.5, 1.0 величина випадкової складової похибки в 3-30 разів менша від систематичної складової похибки, тому випадкову складову для цих класів точності можна не враховувати. Для цих класів точності кутова похибка $\Delta\phi_{U_{0i}}$ має систематичний характер, її можна алгебраїчно додавати.

$$\Delta\phi_{U_i} = \Delta\hat{\phi}_{U_i} + \Delta\phi_{U_{0i}}, \quad (15)$$

де $\Delta\hat{\phi}_{U_i}$ середнє арифметичне значення відліків кутової похибки досліджуваного ТН за шкалою приладу порівняння, отримане при збільшенні та зменшенні випробувальної напруги; $\Delta\phi_{U_{0i}}$ - значення кутових похибок зразкового ТН.

Значення кутової похибки $\Delta\phi_{U_0}$ від впливу зразкового ТН, яке знаходиться з подальшого аналізу, можна використати в якості поправки, а скоректовані за допомогою цієї поправки значення похибок $\Delta\phi_{U_i}$ досліджуваного ТН можна записати так:

$$\Delta\phi_{U_i} = \Delta\hat{\phi}_{U_i} + \Delta\phi_{U_0}. \quad (16)$$

Формула (16) є придатна для оцінювання систематичної складової кожного зі значень похибок паспортних даних ТН. Відповідно скоректовані значення похибок паспортних даних визначаються за формулами:

$$\Delta\phi_{U_1} = \Delta\hat{\phi}_{U_1} + \Delta\phi_{U_0}, \quad \Delta\phi_{U_2} = \Delta\hat{\phi}_{U_2} + \Delta\phi_{U_0}, \quad \Delta\phi_{U_3} = \Delta\hat{\phi}_{U_3} + \Delta\phi_{U_0}. \quad (17)$$

Оскільки значення коефіцієнтів a_U, c_U, g_U у моделі (9) формуються зі значень похибок $\Delta\hat{\phi}_{U_i}$, а вони, в свою чергу, спотворені похибками $\Delta\phi_{U_{0i}}$, то необхідно оцінити, наскільки спотворюється сумарна похибка $\Delta\hat{\phi}_U$. Для цього вираз для моделі похибки (14) подаємо наступним чином:

$$\delta\hat{\phi}_U = (3,333 - 2,5 \frac{U_1}{U_{1н}} - 1,333 \frac{S_2}{S_{2н}}) \delta\hat{\phi}_{U_1} + (1,333 \frac{S_2}{S_{2н}} - 0,333) \delta\hat{\phi}_{U_2} + (2,5 \frac{U_1}{U_{1н}} - 2) \delta\hat{\phi}_{U_3}. \quad (18)$$

У виразі (18) введемо наступні позначення:

$$a_{U_1} = 3,333 - 2,5 \frac{U_1}{U_{1н}} - 1,333 \frac{S_2}{S_{2н}}, \quad (19)$$

$$a_{U_2} = 1,333 \frac{S_2}{S_{2н}} - 0,333, \quad (20)$$

$$a_{U_3} = 2,5 \frac{U_1}{U_{1н}} - 2. \quad (21)$$

Враховуючи (19), (20), (21), запишемо (18) у вигляді:

$$\delta\hat{\phi}_U = \sum_{i=1}^3 a_{U_i} \delta\hat{\phi}_{U_i}, \quad (22)$$

де $a_{U_i} = a_{U_1}, a_{U_2}, a_{U_3}$.

Вирази (16) та (22) дають змогу подати сумарну кутову похибку $\Delta\hat{\phi}_U$ з врахуванням спотворюючого впливу систематичної складової у паспортних даних у вигляді:

$$\Delta\hat{\phi}_U = \sum_{i=1}^3 a_{U_i} \Delta\phi_{U_i} - \sum_{i=1}^3 a_{U_i} \Delta\phi_{U_{0i}}. \quad (23)$$

Перший доданок у формулі (23) $\Delta\phi_U = \sum_{i=1}^3 a_{U_i} \Delta\phi_{U_i}$ - це похибка, яка визначається за паспортними даними ТН за виразом у моделі (17). Другий доданок $\Delta\hat{\phi}_{U_0} = \sum_{i=1}^3 a_{U_i} \Delta\phi_{U_{0i}}$ - це складова сумарної похибки, зумовлена впливом систематичної складової у похибках, відображених у паспортних даних. Нехай оцінка цього впливу не перевищує $\pm \Theta$, тобто справедлива нерівність:

$$-\Theta \leq \Delta\hat{\phi}_{U_0} \leq \Theta. \quad (24)$$

Оскільки навантаження зразкового ТН в процесі повірки не змінюється, то $\Delta\phi_{U_{01}} = \Delta\phi_{U_{02}}$, а другий доданок виразу (23) набуває вигляду:

$$\Delta\hat{\phi}_{U_0} = (a_{U_1} + a_{U_2}) \Delta\phi_{U_{01}} + a_{U_3} \Delta\phi_{U_{03}}. \quad (25)$$

Аналіз виразу (21) спрощується, якщо ввести позначення $a_{U_1} + a_{U_2} = A$ і, використовуючи вирази (19),(20),(21), ввести співвідношення:

$$A = 3 - 2,5 \frac{U_1}{U_{1н}}. \quad (26)$$

З виразу (26) видно, що при $U_1 = 0,8U_{1н}$ $A = 1$, а при $U_1 = 1,2U_{1н}$ $A = 0$. Якщо U_1 збільшується від $0,8U_{1н}$ до $1,2U_{1н}$, то A залишається невід'ємним, зменшуючись від 1 до 0. Крім того, з виразу (21) очевидно, що при $U_1 = 0,8U_{1н}$ $a_{U_3} = 0$, а при $U_1 = 1,2U_{1н}$ $a_{U_3} = 1$. Таким чином, при змінах режиму роботи ТН значення A та a_{U_3} залишаються невід'ємними, тому, враховуючи нерівність (24), буде справедливою також і нерівність:

$$(-A \cdot \Theta - a_{U_3} \cdot \Theta) \leq (A \cdot \Delta\phi_{U_{01}} + a_{U_3} \cdot \Delta\phi_{U_{03}}) \leq (A \cdot \Theta + a_{U_3} \cdot \Theta). \quad (27)$$

Оскільки $A + a_{U_3} = 1$, як це видно з суми правих частин рівнянь (19),(20),(21), а у зразковому ТН $\Delta\phi_{U_{01}} \approx \Delta\phi_{U_{03}} = \Delta\phi_{U_0}$, то нерівність (27) матиме вигляд:

$$-\Theta \leq \Delta\phi_{U_0} \leq \Theta. \quad (28)$$

Порівнюючи вирази (28) та (24), бачимо, що $\Delta\hat{\phi}_{U_0} = \Delta\phi_{U_0}$.

Для ТН високої точності, тобто класів 0.02, 0.05, 0.1, необхідно враховувати спотворюючий вплив систематичної складової у паспортних даних. Оцінка цього впливу визначає також величину $\Delta\phi_{U_0}$, що робить придатним для практичного застосування вираз систематичної складової кутової похибки (16), а відтак обґрунтовує значення поправки, яка може бути застосована для компенсації впливу цієї складової.

Приклад графічного визначення кутової похибки показаний на рис.5а,б. На рис. 5а показано залежності похибки $\Delta\phi_U$ від відношення напруги високовольтної обмотки до номінального значення цієї напруги $U_1/U_{1н}$ при двох різних значеннях опору навантаження вторинної обмотки $Z_2 = 0.25Z_{2н}$ та $Z_2 = Z_{2н}$ ($Z_{2н}$ - номінальне значення опору вторинної обмотки), що отримані з паспортних даних трансформатора.

На рис.5б показано аналогічні залежності похибки $\Delta\phi_U$ від зміни опору навантаження трансформатора – від відношення опору навантаження вторинної обмотки до номінального значення цього опору $Z_2/Z_{2н}$ при двох різних значеннях напруги у високовольтній обмотці $U_1 = 0.8U_{1н}$ та $U_1 = 1.2U_{1н}$. З рисунків видно, що

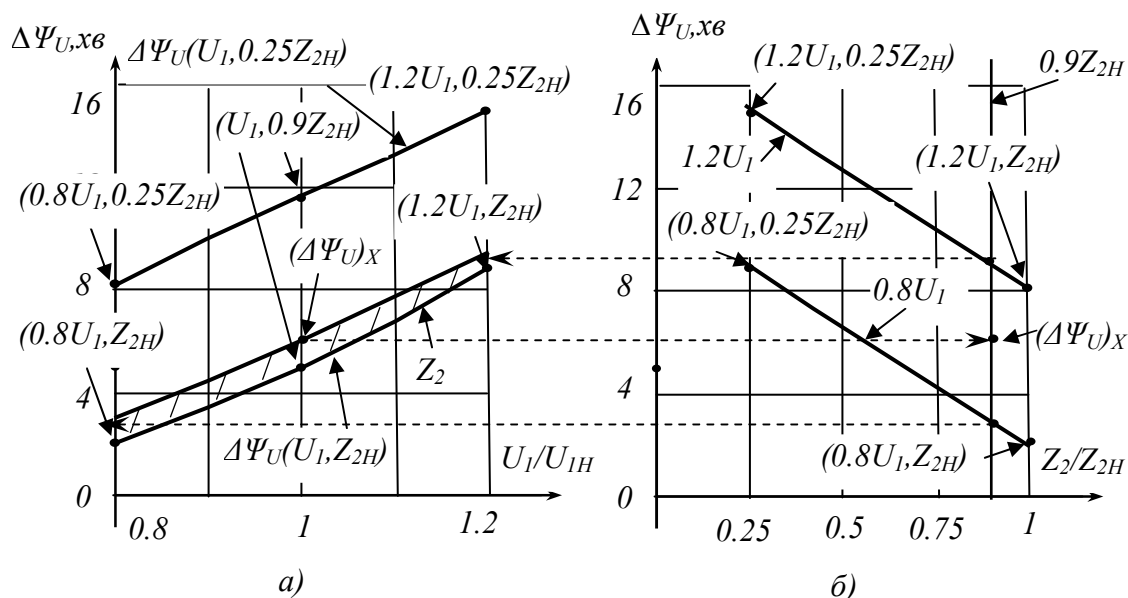


Рисунок 5 – Вибір режиму роботи ТН з мінімальною кутовою похибкою

мінімальне значення похибки $\Delta\phi_U$ при номінальній напрузі високовольтної обмотки буде при значенні опору навантаження $Z_{2opt} = 0.9Z_{2н}$. Тому, вибравши саме такий режим роботи ТН, ми мінімізуємо кутову похибку трансформатора. Аналогічно можна знайти Z_{2opt} при інших напругах експлуатації ТН.

Слід зауважити, що оптимальний режим, при якому отримаємо мінімальну похибку по напрузі дещо відрізняється від режиму, при якому можна отримати мінімальну кутову похибку. Однак практика показує, що, в першу чергу, важливо домогтись мінімальної похибки по напрузі (амплітудної), тому що саме ця похибка найсуттєвіше впливає на результати вимірювань.

Висновки

Запропоновані у статті моделі похибки по напрузі та кутової похибки вимірювального ТН мають суттєві практичні переваги. Запропонований підхід побудови моделей дає змогу підвищити точність систем вимірювання потужності та обліку електроенергії у високовольтних колах без додаткових вимірювальних експериментів, розрахунковим шляхом, не виводячи ТН з експлуатації, що у

високовольтних мережах пов'язано з суттєвими труднощами. При цьому корекція точності цих вимірювальних засобів може здійснюватись автоматично, за допомогою обчислювальних засобів, в режимі реального часу. Слід також відзначити, що запропонований підхід придатний для застосування в розрахунках точності схем релейного захисту.

Література.

1. Дымков А.М., Кибель В.М., Тишенин Ю.В. Трансформаторы напряжения. – М.:Энергия, 1975. –200с.
2. Любимов М.П. и др. Поверка средств электрических измерений. Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.
3. М.Дорожовець, В.Мотало, Б.Стадник, В.Василюк, Р.Борек, А.Ковальчик. Основи метрології та вимірювальної техніки. т.1,2. – Львів, 2005. – 532с.
4. Метрологія та вимірювальна техніка. Під ред. Є.Поліщука. – Львів, 2003, – 544с.
5. ГОСТ 8.216-88 ГСИ. Трансформаторы напряжения. Методика поверки. – 35с.
6. П.Євтух, Н.Куземко. Модель характеристики похибки високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги. //Вісник ТДТУ.- 2004.- Т.9. – №1-С.107-111.
7. П.Євтух, Н.Куземко. Використання паспортних даних високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги для підвищення їх точності. //Вісник ТДТУ.- 2004.- Т.9. – №2-С.89-93.
8. П.Євтух, Н.Куземко. Підвищення точності вимірювальних трансформаторів напруги у випадку застосування лінійної моделі їх похибок. // Праці II міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електротехніка, історія, проблеми і перспективи”, Тернопіль, 2005, с.22-26.
9. П.Євтух, Н.Куземко. Модель характеристики кутової похибки вимірювального трансформатора напруги та визначення її систематичної складової. //Вісник Національного університету „Львівська політехніка”.- 2004.– №500-С.19-24.

Одержано 26.03.2009 р.