

МОДЕЛЬ ХАРАКТЕРИСТИКИ КУТОВОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ СИСТЕМАТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ

© Євтух П.С., Куземко Н.А., 2004

Розроблено модель характеристики кутової похибки високовольтного вимірювального трансформатора напруги, яка дає змогу побудувати характеристику кутової похибки розрахунково, використовуючи паспортні дані трансформаторів напруги. Показана можливість визначення систематичної складової кутової похибки та обґрунтовано вибір поправки для зниження її впливу.

There has been developed model of high voltage measuring transformer angle deviation characteristics. The model enables to build up angle deviation characteristics through calculations involving transformers passes data. There has been shown a possibility to define systematical additive of angle deviation. There have been substantiated the correction choice to decrease its influence.

1. Вступ

Кутова похибка вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) істотно впливає на загальну похибку систем вимірювання потужності та обліку електроенергії у високовольтних колах. Відомо, що у значенні кутової похибки домінує систематична складова [1], вплив якої, в принципі, можна компенсувати введенням відповідних поправок. Однак не існує пристроїв для визначення систематичної складової кутової похибки в умовах пусканалагоджувальних робіт із системами, у яких застосовують вимірювальні ТН, оскільки немає відповідних взірцевих пристроїв високої напруги, які можна застосовувати під час експлуатації вимірювальних ТН. Отже, актуальна науково-технічна задача визначення кутової похибки високовольтних вимірювальних ТН в умовах їх експлуатації та, зокрема, визначення систематичної складової цієї похибки досі не розв'язана. Це зумовлює труднощі у настроюванні систем вимірювання потужності та обліку електроенергії під час ремонтних та пусканалагоджувальних робіт на підприємствах електроенергетики.

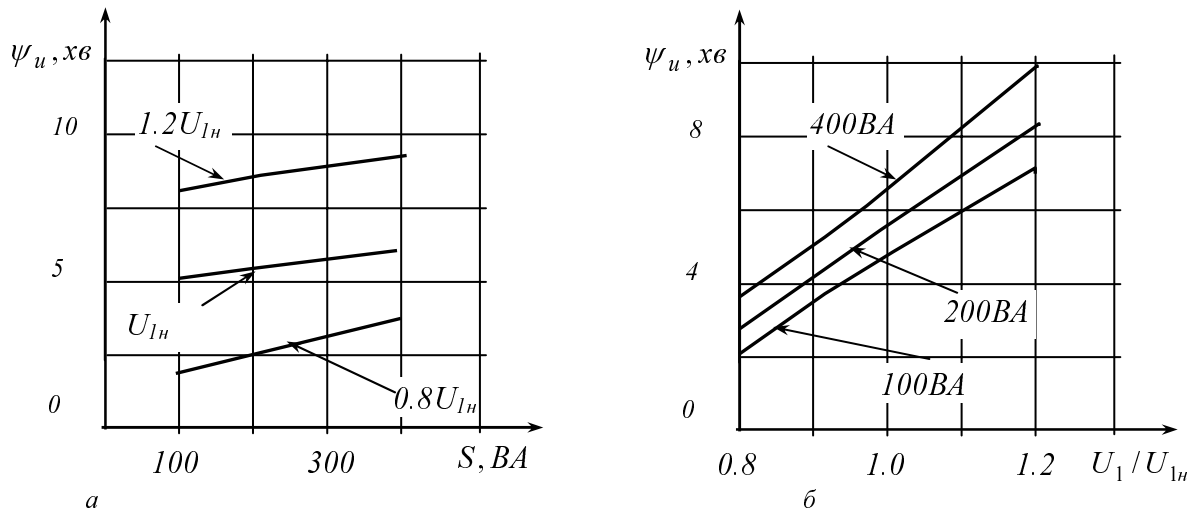
2. Постановка задачі

Поставлено завдання побудови моделі кутової похибки високовольтного вимірювального ТН, придатної для визначення систематичної складової кутової похибки, а також оцінювання ефекту від застосування розробленої моделі.

3. Модель кутової похибки ТН

Модель кутової похибки високовольтних вимірювальних ТН створена на основі використання експериментально встановлених фактів. На рисунку подана експериментально отримана залежність характеристики кутової похибки ϕ_U високовольтного вимірювального ТН від зміни навантаження у низьковольтній обмотці. Така характеристика, як встановлено численними експериментами, є типовою для високовольтних ТН. На рисунку (б) подана залежність характеристики кутової похибки ϕ_U високовольтного вимірювального ТН від впливу відхилень напруги у високовольтній обмотці від номінального значення. Ці залежності практично лінійні – похибка від такого припущення на порядок менша від значення допустимої кутової похибки цього ТН. Такі залежності можна

отримати для кожного вимірювального ТН, користуючись результатами його останньої перевірки або його паспортними даними. Щодо значень кутової похибки $\hat{\phi}_U$, поданих у паспортних даних, то вони отримані на високоточній випробувально-перевірювальній установці заводу-виробника цих вимірювальних засобів і за своєю точністю та об'єктивністю переважають інші джерела даних про похибки вимірювальних ТН.



Залежності кутової похибки $\hat{\phi}_U$ від зміни навантаження у низьковольтній обмотці (а) та від впливу відхилень напруги у високовольтній обмотці від номінального значення (б)

Паспортні дані (або дані, отримані при останній перевірці) про значення куткових похибок ТН $\hat{\phi}_U$ для зручності подальшого аналізу подають у вигляді табл. 1.

У табл. 1 символами $\Delta\hat{\phi}_{U_1}$, $\Delta\hat{\phi}_{U_2}$, $\Delta\hat{\phi}_{U_3}$, $\Delta\hat{\phi}_{U_4}$ позначено абсолютні значення куткових похибок, отриманих експериментально для кожного із значень випробувальної напруги U_1 у високовольтній обмотці при нормованих значеннях навантажень S_2 у низьковольтній обмотці. Всі значення цих похибок подають при загальноновживаному та нормованому коефіцієнті потужності у низьковольтній обмотці $\cos\varphi_2 = 0.8$. Символами U_{1n} та S_{2n} позначено номінальні значення, відповідно, напруги у високовольтній обмотці та навантаження у низьковольтній обмотці.

Динаміка змін кутової похибки при одночасних впливах змін напруги у високовольтній обмотці та змін навантажень у низьковольтній обмотці при лінійних впливах цих змін на кутову характеристику можна подати рівнянням площини у такому вигляді:

$$\Delta\hat{\phi}_U = a_U S_2 + c_U U_1 + g_U, \quad (1)$$

де $\Delta\hat{\phi}_U$ – сумарна кутова похибка, a_U, c_U, g_U – коефіцієнти, які визначають з паспортних даних кожного конкретного ТН. Очевидно, що ця площина повинна проходити через точки, координати яких задають значеннями похибок, поданих у табл. 1. Згідно з вимогами Держстандарту [2] значення похибок нормують для чотирьох точок характеристики точності вимірювального ТН, проте площина (1) повністю визначається трьома точками і для подальшого аналізу використовують дані, наведені для точок 1, 2, 3.

Позначення похибок для нормованих режимів експлуатації ТН

Точки характеристики ТН, у яких нормується значення кутової похибки	Відносне значення напруги у високовольтній обмотці, $U_1 / U_{1н} \cdot 100\%$	Відносне значення навантаження у низьковольтній обмотці, $S_2 / S_{2н} \cdot 100\%$	Кутова похибка, $\Delta\hat{\phi}_U$, хв
1	80	25	$\Delta\hat{\phi}_{U1}$
2	80	100	$\Delta\hat{\phi}_{U2}$
3	120	25	$\Delta\hat{\phi}_{U3}$
4	120	100	$\Delta\hat{\phi}_{U4}$

У координатній формі рівняння площини (1) можна записати так:

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

З виразу (2), після відповідних перетворень, отримані виражені через паспортні значення кутових похибок формули для коефіцієнтів a_U, c_U, g_U у рівнянні (1):

$$a_U = \frac{1.333}{S_{2н}} (\Delta\hat{\phi}_{U2} - \Delta\hat{\phi}_{U1}), \quad (3)$$

$$c_U = \frac{2.5}{U_{1н}} (\Delta\hat{\phi}_{U3} - \Delta\hat{\phi}_{U1}), \quad (4)$$

$$g_U = 3.333\Delta\hat{\phi}_{U1} - 0.33\Delta\hat{\phi}_{U2} - 2\Delta\hat{\phi}_{U3}, \quad (5)$$

де $\Delta\hat{\phi}_{U1}, \Delta\hat{\phi}_{U2}, \Delta\hat{\phi}_{U3}$ – паспортні значення кутових похибок конкретного ТН. Підставивши вирази (3), (4), (5) у (1), отримаємо модель кутової похибки вимірювального ТН у вигляді:

$$\Delta\hat{\phi}_U = \frac{1.333}{S_{2н}} (\Delta\hat{\phi}_{U2} - \Delta\hat{\phi}_{U1}) S_2 + \frac{2.5}{U_{1н}} (\Delta\hat{\phi}_{U3} - \Delta\hat{\phi}_{U1}) U_1 + 3.333\Delta\hat{\phi}_{U1} - 0.33\Delta\hat{\phi}_{U2} - 2\Delta\hat{\phi}_{U3}. \quad (6)$$

Модель (6) дає змогу визначити систематичну складову кутової похибки $\Delta\hat{\phi}_U$, враховуючи особливості апаратної реалізації установки, застосування якої регламентоване Держстандартом для перевірки ТН [2].

Заводська випробувальна установка укомплектована приладом порівняння типу К507 та зразковим ТН класу точності 0.05, а процедура перевірки здійснюється за методикою [2]. Для зручності подальшого аналізу дані цих вимірювальних пристроїв подані у табл. 2 та 3.

Таблиця 2

Основні технічні характеристики приладу К507

Межі вимірювання кутових похибок приладом, хв.	Межі допустимої основної похибки приладу порівняння, хв.
від -3.5 до +6.5	± 0.1
від -10 до +20	± 0.3
від -35 до +65	± 1.0
від -100 до +200	± 3.0
від -350 до +650	± 10.0

**Характеристики зразкового трансформатора перевірювальної
вимірювальної установки**

Класи точності досліджуваного ТН	Межі значень допустимої похибки зразкового ТН у перевірювальній установці, хв.	
	з урахуванням похибок	без урахування похибок
0.02	±1.0	±0.3
0.05	±1.5	±1.0
0.1	±3.0	±1.5
0.2	±5.0	±3.0
0.5	±10.0	±5.0
1.0	±30.0	±10.0

Очевидно, що значення сумарної похибки перевірювальної установки складається зі значень похибки приладу порівняння та значень похибки зразкового ТН. Проте за своєю природою похибка приладу порівняння є випадковою, а похибка зразкового ТН – систематичною, а за рахунок впливу цих випадкової та систематичної похибок в результаті перевірки $\Delta\hat{\phi}_{U_i}$ (тобто у $\Delta\hat{\phi}_{U_1}$, $\Delta\hat{\phi}_{U_2}$, $\Delta\hat{\phi}_{U_3}$, $\Delta\hat{\phi}_{U_4}$) вносяться додаткові $\Delta\phi_{U_{0i}}$ ($\Delta\phi_{U_{01}}$, $\Delta\phi_{U_{02}}$, $\Delta\phi_{U_{03}}$, $\Delta\phi_{U_{04}}$). Табл. 2 та 3 дають змогу порівняти значення випадкової та систематичної складових похибок.

При перевірці ТН з класами точності 0.2, 0.5, 1.0 випадкова складова похибка 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, як рекомендують відповідні нормативні документи [3]:

$$\Delta\phi_{U_i} = \Delta\hat{\phi}_{U_i} + \Delta\phi_{U_{0i}}, \quad (7)$$

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

Значення куткової похибки $\Delta\phi_{U_0}$ від впливу зразкового ТН, яке знаходять з подальшого аналізу, можна використати як поправку, а скориговані за допомогою цієї поправки значення похибок $\Delta\phi_{U_i}$ досліджуваного ТН можна подати формулою:

$$\Delta\phi_{U_i} = \Delta\hat{\phi}_{U_i} + \Delta\phi_{U_0}. \quad (8)$$

Формула (8) є виразом оцінювання систематичної складової кожного зі значень похибок паспортних даних ТН. Відповідно скориговані значення похибок паспортних даних визначаються за формулами:

$$\Delta\phi_{U_1} = \Delta\hat{\phi}_{U_1} + \Delta\phi_{U_0}, \quad \Delta\phi_{U_2} = \Delta\hat{\phi}_{U_2} + \Delta\phi_{U_0}, \quad \Delta\phi_{U_3} = \Delta\hat{\phi}_{U_3} + \Delta\phi_{U_0}. \quad (9)$$

Оскільки значення коефіцієнтів a_U, c_U, g_U у моделі (6) формуються зі значень похибок $\Delta\hat{\phi}_{U_i}$, а вони спотворені похибками $\Delta\phi_{U_{0i}}$, то необхідно оцінити, наскільки спотворюється сумарна похибка $\Delta\hat{\phi}_U$. Для цього вираз для моделі (6) подаємо у такому вигляді:

$$\delta\hat{\phi}_U = \left(3,333 - 2,5 \frac{U_1}{U_{1n}} - 1,333 \frac{S_2}{S_{2n}}\right) \delta\hat{\phi}_{U_1} + \left(1,333 \frac{S_2}{S_{2n}} - 0,333\right) \delta\hat{\phi}_{U_2} + \left(2,5 \frac{U_1}{U_{1n}} - 2\right) \delta\hat{\phi}_{U_3}. \quad (10)$$

У (10) введемо такі позначення:

$$a_{U1} = 3,333 - 2.5 \frac{U_1}{U_{1н}} - 1.333 \frac{S_2}{S_{2н}}, \quad (11)$$

$$a_{U2} = 1.333 \frac{S_2}{S_{2н}} - 0.333, \quad (12)$$

$$a_{U3} = 2.5 \frac{U_1}{U_{1н}} - 2. \quad (13)$$

Враховуючи (11), (12), (13), подамо (10) у вигляді:

$$\delta \hat{\phi}_U = \sum_{i=1}^3 a_{Ui} \delta \hat{\phi}_{Ui}, \quad (14)$$

де $a_{Ui} = a_{U1}, a_{U2}, a_{U3}$.

Вирази (14) та (7) дають змогу подати сумарну кутову похибку $\Delta \hat{\phi}_U$ з урахуванням спотворювального впливу систематичної складової у паспортних даних:

$$\Delta \hat{\phi}_U = \sum_{i=1}^3 a_{Ui} \Delta \phi_{Ui} - \sum_{i=1}^3 a_{Ui} \Delta \phi_{U0i}. \quad (15)$$

Перший доданок у (15) $\Delta \phi_U = \sum_{i=1}^3 a_{Ui} \Delta \phi_{Ui}$ – це похибка, яку визначають за паспортними

даними ТН за виразом у моделі (9). Другий доданок $\Delta \hat{\phi}_{U0} = \sum_{i=1}^3 a_{Ui} \Delta \phi_{U0i}$ – це складова сумарної похибки, зумовлена впливом систематичної складової у похибках, відображених в паспортних даних. Нехай оцінка цього впливу не перевищує $\pm \Theta$, тобто справедлива нерівність:

$$-\Theta \leq \Delta \hat{\phi}_{U0} \leq \Theta. \quad (16)$$

Оскільки навантаження зразкового ТН під час перевірки не змінюється, то $\Delta \phi_{U01} = \Delta \phi_{U02}$, а другий доданок виразу (15) набуває вигляд:

$$\Delta \hat{\phi}_{U0} = (a_{U1} + a_{U2}) \Delta \phi_{U01} + a_{U3} \Delta \phi_{U03}. \quad (17)$$

Аналіз виразу (13) спрощується, якщо ввести позначення $a_{U1} + a_{U2} = A$ і, використовуючи вирази (11), (12), (13), ввести співвідношення:

$$A = 3 - 2.5 \frac{U_1}{U_{1н}}. \quad (18)$$

Вираз (18) показує, 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, вираз (13) свідчить, що при $U_1 = 0.8U_{1н}$ $a_{U3} = 0$, а при $U_1 = 1.2U_{1н}$ $a_{U3} = 1$. Отже, при змінах режиму роботи ТН значення A та a_{U3} залишаються невід'ємними, тому, як випливає з (16), буде справедливим такий вираз:

$$(-A \cdot \Theta - a_{U3} \cdot \Theta) \leq (A \cdot \Delta \phi_{U01} + a_{U3} \cdot \Delta \phi_{U03}) \leq (A \cdot \Theta + a_{U3} \cdot \Theta). \quad (19)$$

Оскільки $A + a_{U3} = 1$, як свідчить сума правих частин формул (11),(12),(13), а у зразкову ТН $\Delta \phi_{U01} \approx \Delta \phi_{U03} = \Delta \phi_{U0}$, то нерівність (19) набуває вигляд:

$$-\Theta \leq \Delta\phi_{U_0} \leq \Theta. \quad (20)$$

Порівнюючи вирази (20) та (16), бачимо, що $\Delta\hat{\phi}_{U_0} = \Delta\phi_{U_0}$.

Для ТН високої точності, тобто класів 0.02, 0.05, 0.1, є актуальною вимога врахування спотворювального впливу систематичної складової у паспортних даних. Табл. 3 дає верхню оцінку цього впливу $\Theta = \pm 3x\delta$. Це значення є верхньою межею оцінки сумарного спотворювального впливу всіх $\Delta\phi_{U_{0i}}$, нівелюючи різницю їх впливів, проте забезпечуючи нормоване значення цієї оцінки. Ця оцінка визначає також величину $\Delta\phi_{U_0}$, що робить придатним для практичного застосування вираз для систематичної складової кутової похибки (8), а відтак обґрунтовує значення поправки, яка може бути застосована для компенсації впливу цієї складової.

4. Висновки

У статті подано модель кутової похибки високовольтного вимірювального ТН, яка дає змогу компенсувати вплив систематичної складової цієї похибки за допомогою поправки. Обґрунтовано також вибір такої поправки.

1. Дымков А.Н., Кибель В.М., Тишенин Ю.В. *Трансформаторы напряжения*. – М., 1975. 2. ГОСТ 8.216-88 ГСИ. *Трансформаторы напряжения. Методика поверки*. 3. Любимов М.П. и др. *Поверка средств электрических измерений. Справочная книга*. – Л., 1987.

УДК 621.3.019: 51.001.57

О. Ю. Лозинський, С. В. Щербовських

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра електроприводу та автоматизації промислових установок

ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА ГОТОВНОСТІ ПРОСТОГО ВІДНОВЛЮВАНОВОГО ОБ’ЄКТА

© Лозинський О.Ю., Щербовських С.В., 2004

Запропоновано новий спосіб побудови математичних моделей надійності для простого ремонтного об’єкта. Отримані моделі, порівняно із загальноновживаними, є ефективнішими при комп’ютерному проектуванні.

In the paper for simple repairable item new mathematical reliability model construction technique is offered. In comparison with current, for computer design the got models are more effective.

Постановка проблеми

При проектуванні відновлюваних електротехнічних об’єктів постає питання забезпечення заданого коефіцієнта готовності $A(t)$. Це завдання найефективніше розв’язується за допомогою аналізу спеціальної однорідної марківської моделі надійності об’єкта. Отже, забезпечення заданого коефіцієнта готовності зводиться до формування математичної моделі надійності у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами та їх багаторазового розв’язування. Застосування сучасних комп’ютерних засобів проектування для дослідження готовності електротехнічних об’єктів дає змогу ефективно розв’язати лише другу частину проблеми, що пов’язана із інтегруванням диференціальних рівнянь. Сьогодні у проблемі забезпечення заданого коефіцієнта готовності, з використанням комп’ютерних систем проектування, основна увага приділяється ефективному формуванню математичної моделі надійності об’єкта.