

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ

Запропоновано компенсувати похибку високовольтного вимірювального трансформатора напруги введенням додаткового малопотужного трансформатора напруги з того ж феромагнітного матеріалу.

Постанова проблеми

Проблема точного обліку електроенергії є дуже гострою і актуальною. Вимоги до точності вимірювання постійно зростають. Сьогодні наша промисловість випускає вимірювальні пристрої (лічильники електроенергії) класу точності 0.2÷0.5. Це точність їх власна по відношенню до струмів та напруг, які до них підводяться, але не по відношенню до струмів та напруг, які мають місце у споживачів. При вимірюванні струму похибка вимірювання визначається як високовольтним вимірювальним трансформатором струму (ВВТС), так і пристроєм введення струму (ПВС), який знаходиться в вимірювальному пристрої і перетворює вторинний струм 5 (1) А ВВТС до необхідного значення (як правило, до 1÷2 mA). При вимірюванні напруги похибка вимірювання також визначається як високовольтним вимірювальним трансформатором напруги (ВВТН), так і пристроєм введення напруги (ПВН), який знаходиться в вимірювальному пристрої і перетворює вторинну напругу 57 (100) В ВВТН до необхідного значення (як правило, 2÷10 В). Отже, при визначенні класу точності вимірювального пристрою похибка ВВТН та ВВТС не враховується і клас точності визначається по струму та напрузі, котрі до нього підводяться.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найбільш ефективним і не витратним способом підвищення точності вимірювальних трансформаторів є електронна компенсація похибки, але, на жаль, її використання для високовольтних трансформаторів обмежено унаслідок обмеженої потужності операційного підсилювача, який є невід'ємним елементом всіх схемних рішень з таким видом компенсації. За кордоном вже проводяться роботи по підвищенню точності ВВТН за допомогою електронної компенсації похибки [1], що свідчить про можливість такого використання.

Деякі схеми з електронною компенсацією похибки вимірювальних трансформаторів напруги можна використовувати для ВВТН на напругах до 6 кВ, але це знижує надійність такого пристрою [2]. Більшість з них вимагає складної конструкції ТН, що небажано [3]. Авторам статті вдалося створити пристрій, в котрому відсутні вище наведені недоліки і на котрий вже отримано патент на винахід [4].

Мета статті. Підвищення точності ВВТН за допомогою електронної компенсації похибки. Питання підвищення точності ВВТС у данному випадку не розглядається.

Основні матеріали дослідження

Пропонований пристрій (рис. 1) дозволяє отримати високоточне значення вимірювальної напруги.

До первинної обмотки W_1 ВВТН, точність якого підвищується, підключене джерело вимірюваної напруги u_1 , з регульованого резистора R_2 дільника напруги вторинної обмотки W_2 ВВТН частина напруги подається на один вхід операційного підсилювача (ОП), де вона порівнюється з напругою вторинної обмотки W_3 додаткового вимірювального трансформатора напруги (ДВТН) на іншому вході ОП.

¹ Національний технічний університет "ХПІ", канд. техн. наук. проф.

² Національний технічний університет "ХПІ", аспірант

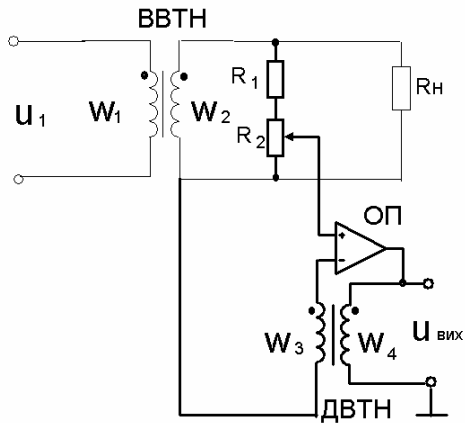


Рис. 1 – Пристрій для підвищення точності вимірювальних трансформаторів напруги

де l_1, l_2, S_1, S_2 - довжини ліній магнітних полів, поперечні перерізи магнітопроводів ВВТН, ДВТН відповідно; $k_{m1}, k_{m2}, Q_{01}, Q_{02}$ - коефіцієнти заповнення між вікон магнітопроводів, перетин вікон магнітопроводів ВВТН і ДВТН відповідно; l_{m1}, l_{m2} - середня довжина вітка міді первинних обмоток ВВТН і ДВТН відповідно; $U_{1\text{ном}}, U_{\text{вихном}}$ - амплітудні значення номінальних напруг первинних обмоток ВВТН і ДВТН відповідно.

Отже, при виконанні (1) та (2) маємо:

$$\dot{U}_{\text{вих}} = k \dot{U}_1, \quad (3)$$

$$\text{де } k = \frac{W_2 W_4}{W_1 W_3} n,$$

$$\text{де } n = \frac{R_3}{R_3 + R_2} - \text{коефіцієнт дільника напруги; } W_1, W_4 - \text{число витків первинних обмоток}$$

ВВТН, ДВТН відповідно; W_2, W_3 - число витків вторинних обмоток ВВТН, ДВТН відповідно;

Такий принцип дії забезпечує надійність запропонованого пристрою, що дуже важливо в енергетиці. ВВТН одночасно може жити засоби захисту і вимірювання, які не вимагають високу точність, а ДВТН створювати високоточне значення напруги для точних вимірювальних пристроїв (наприклад, мікропроцесорних лічильників електроенергії).

При наявності опору навантаження має місце похибка від спадання напруги від струму навантаження, в цьому випадку вторинна напруга ВВТН u_2 буде приблизно дорівнювати (як свідчать дослідження):

$$\dot{U}_2 = \frac{W_2}{W_1} \dot{U}_1 - r_\Sigma \dot{I}_2, \quad (4)$$

де r_Σ - загальний опір, який враховує опір первинної і вторинної обмоток ВВТН; \dot{I}_2 - струм вторинної обмотки ВВТН, обумовлений опором навантаження.

Тоді:

$$\dot{U}_{\text{вих}} \neq k \dot{U}_1. \quad (5)$$

Спад напруги $r_\Sigma \dot{I}_2$ можна компенсувати спадом напруги на резисторі R_3 (рис. 2), так що при $R_3 = nr_\Sigma$ будемо мати:

$$n \left(\frac{W_2 \dot{U}_2}{W_1} - r_\Sigma \dot{I}_2 \right) + \dot{I}_2 R_3 = \dot{U}_3, \quad (6)$$

де \dot{U}_3 - вторинна напруга ДВТН.

Необхідно відмітити малий вплив спадання напруги $R_3 \dot{I}_2$ на напругу навантаження, при включенні резистора R_3 у вторинну обмотку ВВТН. Якщо при заданому навантаженні загальна

На підставі викладень, наданих в [5], фазова похибка трансформатора напруги є визначальною.

При рівності фазових похибок ВВТН та ДВТН, при рівності їх номінальних значень індукцій і виконанні магнітопроводів двох трансформаторів з однакової сталі маємо наступні співвідношення параметрів двох трансформаторів, при яких напруга $u_{\text{вих}}$ на первинній обмотці W_4 буде пропорційна вимірювальній напрузі u_1 на первинній обмотці ВВТН:

$$\frac{l_{m1} l_1}{k_{m1} Q_{01} S_1} = \frac{l_{m2} l_2}{k_{m2} Q_{02} S_2}; \quad (1)$$

$$W_4 = \frac{\dot{U}_{\text{вихном}} W_1 S_1}{U_{1\text{ном}} S_2}, \quad (2)$$

похибка ВВТН дорівнює 0.4 %, а похибка від спадання напруги $r_{\Sigma} i_2$ складає 50 % від загальної похибки, тобто 0.2 %, а з дільника напруги знімається 1÷5 В, тобто у 100÷20 раз менше напруги виходу, отже похибка, яка вноситься $R_3 i_2$ дорівнює 0.002 %÷0.01 % і практично не впливає на загальну похибку трансформатора напруги.

Таким чином, таке усунення впливу навантаження можна використовувати тільки для однофазних вимірювальних трансформаторів напруги.

Для трьохфазних ВВТН, коли відсутній провід вороття струму, спад напруги $r_{\Sigma} i_2$ можна компенсувати включенням трансформатора струму послідовно з вторинною обмоткою ВВТН, навантаженого на резистор R_3 (рис. 3), так що:

$$nr_{\Sigma} \dot{I}_2 = \dot{I}_3 R_3, \quad (7)$$

де $\dot{I}_3 = \frac{W_5 \dot{I}_2}{W_6}$ - струм вторинної обмотки ТС, де W_5, W_6 - число витків первинної і вторинної обмотки ТС.

Тоді:

$$n \frac{W_2 \dot{U}_1}{W_1} - nr_{\Sigma} \dot{I}_2 + \dot{I}_3 R_3 = \dot{U}_3. \quad (8)$$

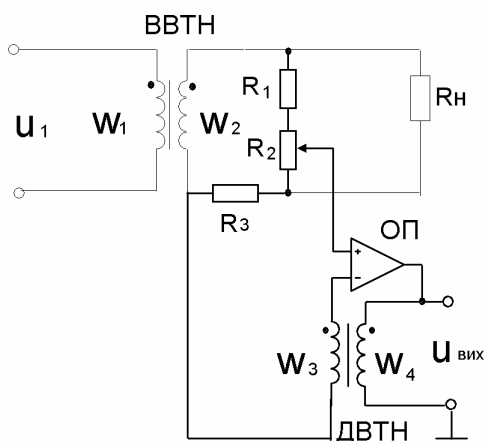


Рис. 2 – Пристрій підвищення точності вимірювального трансформатора напруги з усуненням впливу опору навантаження для однофазних ТН

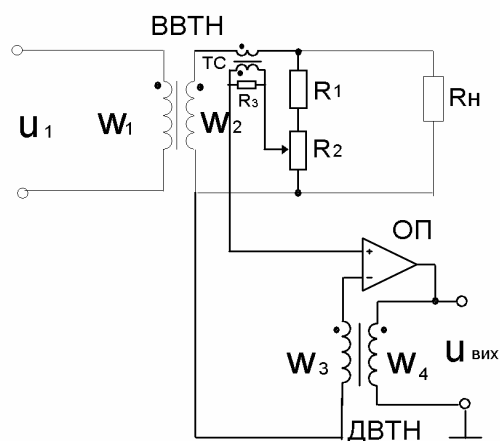


Рис. 3 – Пристрій підвищення точності вимірювального трансформатора напруги з усуненням впливу опору навантаження для трьохфазних ТН

Похибка ТС не буде впливати на точність компенсації впливу навантаження. Так при похибці ТС 1 % загальна похибка компенсації буде дорівнювати 0.002 %.

В результаті при наявності опору навантаження для будь-якого виконання трансформатору виконується співвідношення (3).

Таким чином, за допомогою пропонованого пристрою можна отримати високу точність вимірювання напруги для частини навантаження або умонтувати пропоноване в конкретний вимірювальний пристрій, у зв'язку з цим, виникає можливість практично без зниження надійності атестувати засіб вимірювання, враховуючи похибку високовольтного вимірювального трансформатора напруги. Існуючий стандарт вихідної напруги ВВТН $100/\sqrt{3}$ В може бути доданий значеннями в межах 5÷10 В, тоді заводи зможуть випускати ВВТН з запропонованою добавкою, яка буде настроюватися на заводі і буде доступна усім споживачам при підключенні через повторювач.

Таким чином, розміри ДВТН визначаються габаритними розмірами трансформатора, точність якого підвищується. Може виникнути ситуація, коли під час проектування встановлюється, що потужність ОП повинна бути достатньо великою, що неприпустимо. В такому разі

схема (рис. 1) може бути трішки змінена (рис. 4). Принцип дії залишається таким же, з тією різницею, що у формулі (6) $u_{вихн}$ замінюється на напругу первинної обмотки $u_{4н}$ так, що:

$$W_4 = \frac{\dot{U}_{4нн} W_1 S_1}{\dot{U}_{1нн} S_2}. \quad (9)$$

А вихідна напруга пропорційна різниці напруг на кінцях обмотки W_4 ДВТН:

$$\dot{U}_{вих} = K(\dot{U}_2 - \dot{U}_{оп}), \quad (10)$$

де K - коефіцієнт пропорційності, який залежить від схеми виконання віднімального.

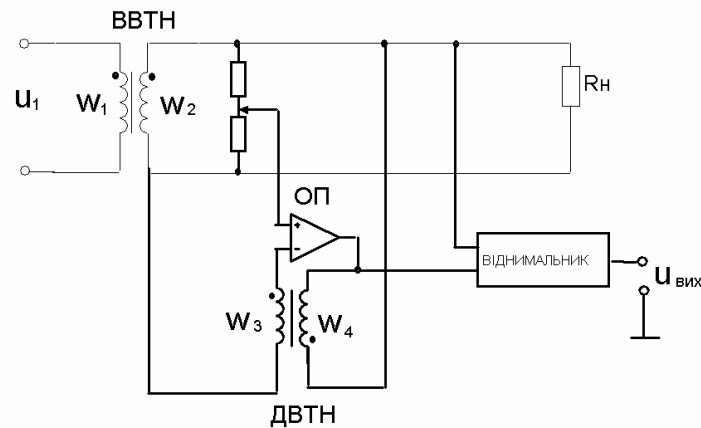


Рис. 4 – Пристрій підвищення точності вимірювального трансформатора напруги

У разі наявності опору навантаження, в залежності від виконання трансформатора напруги (однофазний чи трьохфазний) схеми рис. 2, рис. 3 перетворюються аналогічно зі схемою рис.1.

Висновки

Таким чином, запропонований спосіб компенсації без усіляких додаткових змін в документації і конструкції високовольтних трансформаторів може бути використаний в локальних вимірювальних пристроях, також є можливість реалізації в окремому пристрої, який буде додаватись до ВВТН.

Перелік посилань

1. *Slomovitz D.* Electronic Based High-Voltage Measuring Transformers / *D. Slomovitz* // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol.17. – №2. – P. 359-361.
2. *Slomovitz D.* Electronic Compensation of Voltage Transformers / *D. Slomovitz* // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol.37. – №4. – P. 652-654.
3. *Deacon T.A.* Comments on "Electronic Error- Compensation of a Voltage Transformers" / *T.A. Deacon* // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 1980. – Vol. IM-29. – №1. – P. 79-80.
4. Пат. 81842 Україна, МПК⁶ G 01 19/ 00. Пристрій для електронної компенсації похибки вимірювальних трансформаторів напруги / *В.У. Кизилов, Н.В. Рудевич.* – № а2006; Заявл. 10.04.2006; Опубл. 11.02.2008.
5. *Кизилов В.У.* Проектування вимірювальних трансформаторів струму та напруг, трансреакторів та дроселів змінного струму пристроїв автоматики енергосистем: Навчально-методичний посібник / *В.У. Кизилов.* – Харків: ХДПУ, 2000. – 73 с.

Рецензент: Ю.В. Владіміров,
канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ"

Стаття надійшла 06.04.2008