

В.У. КИЗИЛОВ, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХП»
Н.В. РУДЕВИЧ, канд. техн. наук., доц., НТУ «ХП»

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

В роботі показано, що самым ефективним способом підвищення точності преобразования действующих высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения является электронная компенсация погрешности. Приведены недостатки существующих схемных решений высоковольтных трансформаторов напряжения с электронной компенсацией погрешности. Предложена схема надежного устройства электронной компенсации погрешности высоковольтного трансформатора напряжения.

It is in-process rotined that electronic indemnification of error is the most effective method of increase of exactness of transformation of operating high-voltages measuring transformers of tension. The lacks of existent schematics of high-voltages transformers of tension are resulted with electronic indemnification of error. The chart of reliable device of electronic indemnification of error of high-voltage transformer of tension is offered.

Постановка проблеми. Значна відмінність вимірюваних значень електричних величин від дійсних їх значень у високовольтних мережах енергосистем, обумовлена наявністю похибок перетворення високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги (ВВТН) та струму.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. В даний час набуло розповсюдження використання у якості феромагнітного матеріалу осердя нанокристалічних і аморфних сплавів, які мають вузьку петлю гистерезису і лінійні характеристики. Виготовлення трансформаторів на осердях з таких сплавів дозволяє отримати клас точності 0.2S, однак вартість при цьому значно збільшується по зрівнянню за традиційні аналоги.

При перетворенні напруги за кордоном почали застосовувати оптоелектронні трансформатори, побудовані на ефекті Поккельса. Такі трансформатори мають широку смугу пропускання, малі габаритні розміри та достатньо високу точність перетворення, на рівні десятих часток відсотка [1]. До недоліків можна віднести малу вихідну потужність та значну вартість.

Невирішені проблеми. Нажаль, тисячі вимірювальних трансформаторів напруги (ВТН), які сьогодні експлуатуються в електроенергетичних системах, мають в найкращому випадку клас точності 0.5 і заміна їх в короткі терміни неможлива.

Мета статті. Визначення ефективного способу підвищення точності перетворення діючих ВВТН.

Основний матеріал досліджень. Вирішити проблему підвищення точності перетворення діючих ВВТН можна шляхом застосування електронної компенсації похибки.

Існує ряд схемних рішень ВТН з електронною компенсацією похибки [2-6], які можуть використовуватись для трансформаторів напруги пристроїв введення напруги. Використання тільки деяких з них можливе для високовольтних трансформаторів напруги. На рис. 1. представлена схема ВТН з електронною компенсацією, яка може застосовуватись для трансформаторів на напругу 6-35 кВ [5].

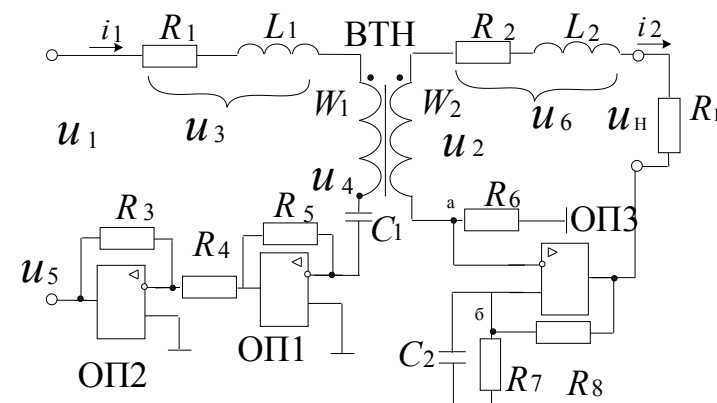


Рис. 1. Схема компенсації падіння напруги в первинній і вторинній обмотці ВТН окремо

Як відомо, основною причиною виникнення похибки в трансформаторі напруги є падіння напруги на опорі первинної обмотки від протікання струму намагнічування та струму навантаження і падіння напруги на опорі вторинної обмотки від протікання струму навантаження.

В схемі на рис.1 падіння напруги на ємності C_1 компенсує падіння напруги на індуктивності L_1 в первинній обмотці. Падіння напруги на активному опорі R_1 від протікання струму i_1 компенсується за допомогою певного підключення операційних підсилювачів ОП1 та ОП2 та резисторів R_3, R_4, R_5 .

При повній компенсації падіння напруги на первинній обмотці повинні виконуватись рівняння $i_1 R_5 \frac{R_3}{R_4} + i_1 \frac{j}{\omega C_1} = R_1 i_1 + j \omega L_1 i_1$ (ω - кутова частота).

Для компенсації падіння напруги на вторинній обмотці використовується ОПЗ з певним підключенням ємності та опорів.

$$\text{Компенсація буде здійснюватись за умов } \frac{R_6}{R_2} = \frac{R_7}{R_8} \text{ та } C_2 = \frac{L_2}{R_6 R_8}.$$

Перевагами даного схемного рішення, як стверджують автори, є: 1) висока точність (зниження похибки перетворення до сотих відсотка), 2) можливість використання для ВВТН, 3) можливість використання для діючих трансформаторів. Недоліки цього рішення: 1) частотна залежність похибки компенсації, 2) велика кількість активних елементів, 3) необхідність різних блоків живлення для ОП встановлених в первинній та вторинній обмотках, 4) підвищенні вимоги до ізоляції трансформатора джерела живлення ОП у випадку з'єднання у трикутник обмоток трьохфазного трансформатора або при з'єднанні обмоток у зірку в мережі з ізольованою нейтраллю, 5) необхідність ОП на низькій стороні ВТН створювати весь струм навантаження.

На рис.2 приведено схемне рішення, яке також можна застосовувати для ВВТН [6].

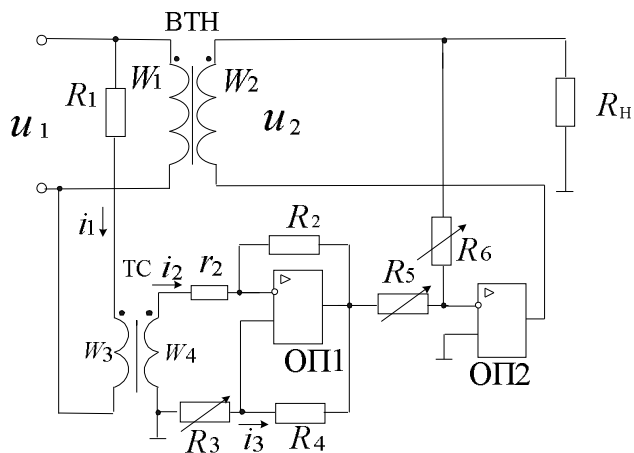


Рис. 2 - Схема компенсації похибки за допомогою ТС

На резисторі R_1 напруга u_1 перетворюється в струм i_1 , що протікає по первинній обмотці W_3 трансформатора струму (ТС), котрий має електронну компенсацію, звідки вихідна напруга ОП1 буде пропорційна вимірювальній напрузі. Вихідна напруга ОП1 через резистор R_5 надходить на вхід ОП2, де вона порівнюється з напругою на навантаженні U_H через резистор R_6 і на

виході ОП2 буде така напруга, що $U_H = \frac{(r_2 + R_2)R_6}{R_1 R_5} \frac{W_3}{W_4} U_1$. Отже, при певнім

значенні опорів R_1, R_2, R_5, R_6 напруга U_H буде пропорційна вимірюваній напрузі U_1 . Перевагами пристрою по схемі рис. 2 є висока точність та можливість використання для діючих ВВТН.

Схема має два недоліки. Перший полягає в тому, що в резисторі R_1 розсіюється досить значна потужність. Так при струмі $I_1 = 1 \div 10$ мА та при напрузі $U_1 = 10$ кВ на резисторі R_1 розсіюється потужність від $10 \div 100$ Вт у номінальному режимі. На 110 кВ ця величина збільшується на порядок, тобто складе $110 \div 1100$ Вт. Інший недолік пристрою за схемою полягає в тому, що максимальний струм навантаження обмежується максимальним струмом ОП2.

Як можна бачити, загальним недоліком відомих схем ВТН з електронною компенсацією похибки, які можна використовувати для діючих ВВТН, є створення операційним підсилювачем усього струму навантаження, що значно знижує надійність такого трансформатора. У разі виходу з ладу ОП буде знеструмлене усе навантаження.

Отже, з точки зору надійності, доцільно використання такої компенсації, коли ОП створює не всю потужність трансформатора, а тільки для частини навантаження, яка потребує високу точність (наприклад, мікропроцесорні лічильники).

На рис. 3 представлено схемне рішення, де відсутній вище наведений недолік [7].

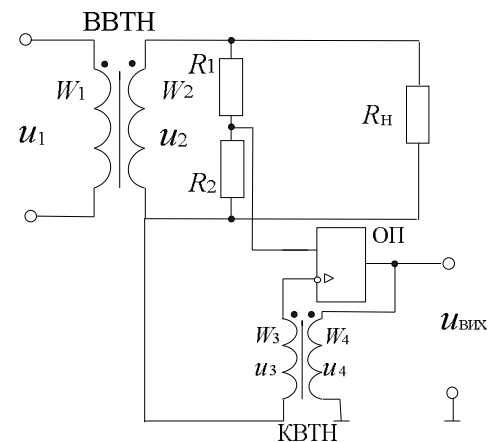


Рис. 3 - Схема пристрою електронної компенсації похибки ВВТН

Напряга з дільника на резисторі R_2 порівнюється з напругою u_3 на виході компенсуючого вимірювального трансформатора напруги (КВТН). Операційний підсилювач змінює напругу на первинній обмотці КВТН таким чином, що напруга на його вході стає рівною нулю. Якщо КВТН розрахувати так, що його похибки при будь-якому значенні u_1 рівні похибкам ВВТН, то в цьому випадку напруга u_4 на виході пристрою буде пропорційна вимірюваній напрузі u_1 . Рівність похибок ВВТН та КВТН можливе при виконанні умов: 1) ідентичність феромагнітних матеріалів ВВТН та КВТН; 2)

$$\frac{l_1 l_{m1}}{k_{m1} Q_{01} S_1} = \frac{l_2 l_{m2}}{k_{m2} Q_{02} S_2}, W_4 = \frac{U_{mн4} W_1 S_1}{U_{mн1} S_2}$$

(l_1, l_2 – середня довжина лінії магнітного поля осердя ВВТН та КВТН відповідно; l_{m1}, l_{m2} – середня довжина витка первинної обмотки ВВТН та КВТН відповідно; k_{m1}, k_{m2} – коефіцієнт заповнення вікна між ВВТН та КВТН відповідно; Q_{01}, Q_{02} – площа вікна осердя ВВТН та КВТН відповідно; S_1, S_2 – поперечний переріз осердя ВВТН та КВТН відповідно).

За допомогою дільника напруги, КВТН та одного ОП створено паралельний канал для засобів вимірювання, що потребують високу точність. Сьогодні засоби вимірювання зазвичай виготовляють на мікропроцесорній базі і, отже, потужність їх споживання незначна – не перевищує 0.2 ВА. Для сучасних операційних підсилювачів забезпечення такої потужності можливе без зниження надійності.

Таким чином, високовольтний вимірювальний трансформатор напруги може одночасно живити пристрої захисту і вимірювання, які не потребують високої точності, а пристрій електронної компенсації похибки ВВТН дозволяє формувати напругу однозначно пов'язану з вимірюваною напругою по формі для засобів вимірювання.

Запропонований пристрій не потребує змінення в стандартній конструкції ВВТН і може бути застосований для діючих ВВТН, при цьому розміри КВТН можуть бути значно меншими за ВВТН. В пристрої можливе усунення впливу зміни навантаження на похибку компенсації ВВТН, але в цій роботі це не розглядається. Навіть якщо в процесі створення пристрою для діючого ВВТН не вдасться 100 % забезпечити ідентичність феромагнітних матеріалів ВВТН та КВТН, все одно буде скомпенсована значна частина похибки високовольтного трансформатора.

Ще одною перевагою даного схемного рішення перед вище наведеними є те, що вихідна напруга пристрою не перевищує 15 В (максимальна напруга ОП), а, отже, може бути подана безпосередньо на мікропроцесорний пристрій

Висновки. На сьогодні, в умовах що склались, використання електронної компенсації похибки, а саме пристрою по схемі рис.3, для підвищення точності перетворення діючих високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги є найбільш ефективним і не затратним способом.

Список джерел: 1. *Rahmatian F.* 230 kV optical voltage transducers using multiple electric field sensors / *F. Rahmatian, P. Chavez, A. Jaeger* // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17/ - № 2. – P. 417–422. 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 transformer" / *T.A. Deacon* // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 1980/ - Vol. IM-29. - № 1. – P. 79-80. 4. *Slomovitz D.* Electronic compensation of inductive voltage dividers and standart voltage transformers / *D. Slomovitz* // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol. 37. - № 4. – P. 652–654. 5. *Slomovitz D.* Electronic based high-voltage measuring transformers / *D. Slomovitz* // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17. - № 2. - P. 359–361. 6. *Рудевич Н. В.* Повышение точности измерительных трансформаторов напряжения / *Н. В. Рудевич* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2005. – №36. – С. 99– 102. 7. Пат. 81842 Україна, МПК⁸ G 01 R 19/00, H 01 F 27/42. Пристрій для електронної компенсації похибки вимірювальних трансформаторів напруги / *Кизилов В. У., Рудевич Н. В.*; заявник та патентовласник *Кизилов В. У.* – № а 2006 03919; заявл. 10.04.2006; опубл. 11.02.2008, Бюл. №3.



Кизилов Володимир Улянович закінчив в 1959 році закінчив Харківський політехнічний інститут по спеціальності «Електричні станції, мережі і системи». Захистив в 1968 році кандидатську дисертацію на тему «Время-импульсный статический преобразователь мощности повышенной частоты». Наукові інтереси: компенсація реактивної потужності, зменшення похибок перетворення високовольтних вимірювальних трансформаторів, визначення місця пошкодження.



Рудевич Наталія Валентинівна закінчила в 2005 році електроенергетичний факультет НТУ «ХПІ». В 2009 році захистила кандидатську дисертацію на тему «Зменшення похибок, обумовлених високовольтними трансформаторами струму та напруги, приєднанням до їхніх вторинних кіл компенсуювальних пристроїв». Наукові інтереси: зменшення похибок перетворення високовольтних вимірювальних трансформаторів.

Поступила в редакцію 03.09.2010