

Аналіз аварійних режимів роботи вимірювальних трансформаторів струму

Андрій Яцейко, Роман Ференсович

Кафедра електричних систем та мереж, Національний університет "Львівська політехніка", УКРАЇНА, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, E-mail: femary@ukr.net

Abstract – Disconnecting the secondary circuits from current transformers are accompanied by the occurrence on the terminals of their secondary windings surges which are dangerous for isolation of current transformers, attached to them equipment and life staff.

The paper analyzes emergency modes of working two-stage current transformer type TFZM-500 after disconnecting secondary windings its stages. Researches were conducted on created in computer program design scheme of this cascade transformer which allows to model various modes of its working.

Results of investigation have theoretical and practical significance for further analysis modes of disconnecting secondary circuits of current transformers in order to create effective and reliable methods of protecting from surges.

It is shown a block diagram of current transformer protection system from action of dangerous surges after disconnecting its secondary circuits which based on using microprocessor technology.

Ключові слова – трансформатор струму, обмотка, високовольтний імпульс, перенапряга, розмикання, осцилограма.

I. Вступ

Розмикання вторинних кіл вимірювальних трансформаторів струму (ТС) являється аварійним режимом їх роботи, який необхідно якомога швидше усувати. Різке зростання результуючого магнітного потоку в осерді ТС внаслідок зникнення розмагнічуючої вторинної магнітосили ($I_2 = 0$) призводить до збільшення активних втрат у сталі, перегрівання магнітопроводу, ізоляції обмоток і в кінцевому випадку – пошкодження ТС.

Крім цього, результуючий магнітний потік індукуює у вторинній обмотці високовольтні імпульси напруги, амплітуда яких може сягати значень декількох кіловольт (на відміну від кількох десятків вольт у нормальному режимі). Такі рівні перенапруг створюють небезпеку руйнування самих трансформаторів, приєднаної до них апаратури та електричного ураження обслуговуючого персоналу.

На жаль, такі явища в процесі експлуатації вимірювальних ТС мають місце і тому питання їх безпечної експлуатації та створення ефективних і надійних способів захисту від перенапруг за розмикання вторинних кіл є досить актуальними.

II. Аналіз процесів за розмикання вторинних кіл ТС

Для оцінки рівня безпечної роботи ТС зручно користуватися показником частоти виникання крахової події $\omega_{к.п}$ – частоти появи на виводах вторинної обмотки високовольтних імпульсів напруги, небезпечних для ізоляції ТС, їх вторинних кіл та життя

обслуговуючого персоналу [1]. Даний показник розраховується для кожного типу ТС за формулою

$$\omega_{к.п} = p_{к.п} \cdot \omega_{п.р.}, \quad (1)$$

де $p_{к.п}$ – ймовірність виникнення крахової події; $\omega_{п.р.}$ – частота порушень нормального режиму роботи ТС, тобто кількість розмикань його вторинної обмотки, рік⁻¹.

Проведення дослідів на реальних високовольтних електроустановках має певні труднощі, зумовлені дороговизною виготовлення обладнання, можливістю його пошкодження під час випробувань, необхідністю забезпечення безпечних умов роботи персоналу, його захисту від дії високої напруги тощо.

Сучасний розвиток комп'ютерної техніки та програмного забезпечення дозволяє якісно та без особливих затрат змоделювати та проаналізувати досліджувані об'єкти й явища. Цифрове моделювання є ефективним методом досліджень. Його інструментарій забезпечує всебічний аналіз створеної моделі, отримання достовірних результатів, можливість швидкої зміни процесів чи параметрів моделі, моделювання різноманітних впливів на неї.

Цифрові комплекси мають достатньо велику базу для аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів у електричних колах, моделювання складних систем та установок, аналізу їх роботи.

У програмному середовищі була створена розрахункова схема каскадного двоступеневого трансформатора типу ТФЗМ-500, представлена на Рис. 1.

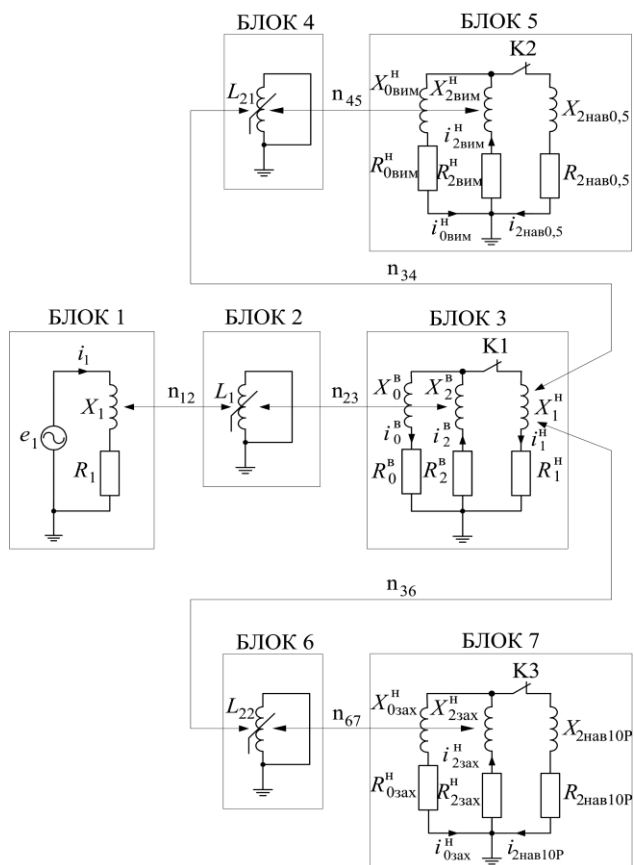


Рис. 1. Розрахункова схема досліджуваного каскадного трансформатора струму ТФЗМ-500.

Кожен із ступенів є окремим ТС з проміжним коефіцієнтом трансформації. Наявність двох каскадів дозволяє здійснювати поетапну трансформацію первинного номінального струму $I_{1\text{НОМ}} = 2000 \text{ А}$ до величини вторинного номінального струму $I_{2\text{НОМ}}^H = 1 \text{ А}$ та виконання ізоляції кожного ступеню на половину номінальної напруги. Проміжний вторинний струм верхнього ступеню рівний $I_{2\text{НОМ}}^B = I_{1\text{НОМ}}^H = 5 \text{ А}$.

Схема містить сім розрахункових блоків. Блок 1 призначений для імітації первинного струму i_1 досліджуваного каскадного ТС, амплітуда якого змінюється опорами R_1 та X_1 . Електрорушійна сила e_1 визначає миттєве значення фазної напруги електричної мережі 500 кВ. У блоках 2, 4 та 6 нелінійними індуктивностями L_1 , L_{21} та L_{22} задаються криві намагнічування магнітопроводів відповідних ступенів.

Блок 3 імітує: вітку намагнічування верхнього ступеню (опори R_0^B , X_0^B), вторинну обмотку верхнього ступеню (опори R_2^B , X_2^B) та первинну обмотку нижнього ступеню (опори R_1^H , X_1^H). Блок 5 імітує трансформатор для вимірювань (клас точності 0,5): вітку намагнічування (опори $R_{0\text{ВІМ}}^H$, $X_{0\text{ВІМ}}^H$), вторинну вимірювальну обмотку (опори $R_{2\text{ВІМ}}^H$, $X_{2\text{ВІМ}}^H$) та її навантаження (опори $R_{2\text{наВ0,5}}^H$, $X_{2\text{наВ0,5}}^H$).

Блок 7 імітує трансформатор для захисту (клас точності 10Р): вітку намагнічування (опори $R_{0\text{зах}}^H$, $X_{0\text{зах}}^H$), вторинну релейну обмотку (опори $R_{2\text{зах}}^H$, $X_{2\text{зах}}^H$) та сумарний опір пристроїв захисту й автоматики (опори $R_{2\text{наВ10Р}}^H$, $X_{2\text{наВ10Р}}^H$).

Зв'язки між першим і другим, третім і четвертим, третім і шостим блоками задаються відповідно коефіцієнтами n_{12} , n_{34} та n_{36} , які рівні одиниці.

Коефіцієнт зв'язку n_{23} між другим та третім блоками рівний коефіцієнту трансформації ТС верхнього ступеню

$$n_{23} = I_{1\text{НОМ}} / I_{2\text{НОМ}}^B = 2000 / 5 = 400. \quad (2)$$

Коефіцієнти зв'язку n_{45} та n_{67} відповідно рівні коефіцієнтам трансформації ТС для вимірювань та для захисту і визначаються за формулою

$$n_{45} = n_{67} = I_{1\text{НОМ}}^H / I_{2\text{НОМ}}^H = 5 / 1 = 5. \quad (3)$$

Криві намагнічування осердь верхнього та нижнього ступенів досліджуваного каскадного трансформатора у програмному середовищі задаються їх вебер-амперними характеристиками $\psi = f(I_1)$ (Рис.2, 3), розрахованими за параметрами кожного магнітопроводу із кривої $B_{\text{max}} = f(H)$ заданої марки електротехнічної сталі [2].

Розмикання вторинних обмоток трансформаторів верхнього та нижнього ступенів здійснюється ключами К1, К2 та К3 (Рис.1).

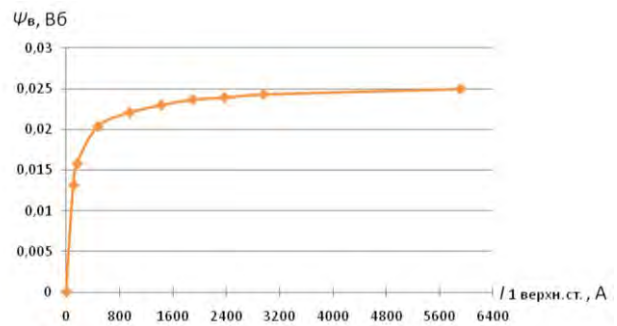


Рис. 2. Вебер-амперна характеристика осердя верхнього ступеню

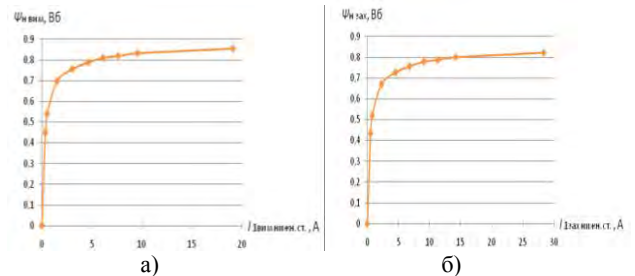


Рис. 3. Вебер-амперні характеристики осердь трансформаторів для вимірювань (а) та для захисту (б).

На Рис.4, 5, 6 відповідно наведено осцилограми вторинних напруг трансформаторів верхнього ($u_2^B(t)$) та нижнього (вимірювальна обмотка – $u_{2\text{ВІМ}}^H(t)$; релейна обмотка – $u_{2\text{зах}}^H(t)$) ступенів до та після розмикання їх вторинних кіл за номінального та десятикратного значення первинного струму досліджуваного каскадного ТС.

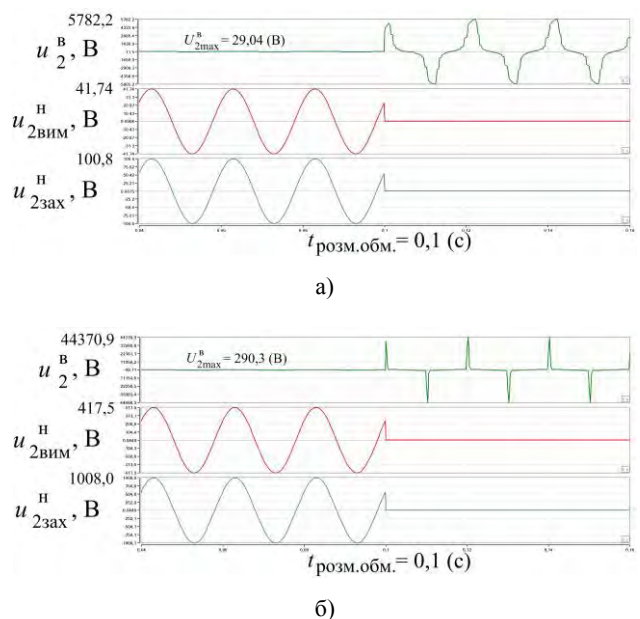


Рис. 4. Осцилограми напруг каскадного ТС за розмикання вторинної обмотки верхнього ступеню:

а) $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 2000 \text{ А}$; б) $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 20000 \text{ А}$

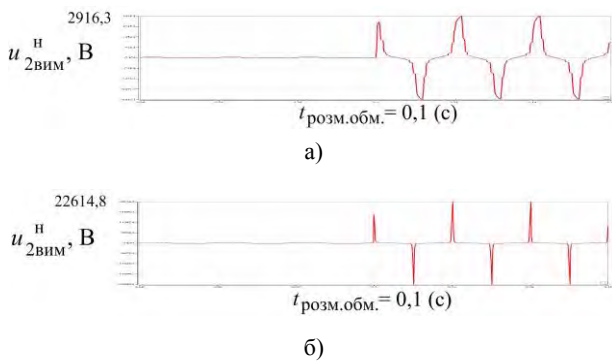


Рис. 5. Осцилограми напруги на виводах вторинної виміральної обмотки каскадного ТС:

а) $I_1 = I_{1\text{ном}} = 2000 \text{ A}$; б) $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{ном}} = 20000 \text{ A}$

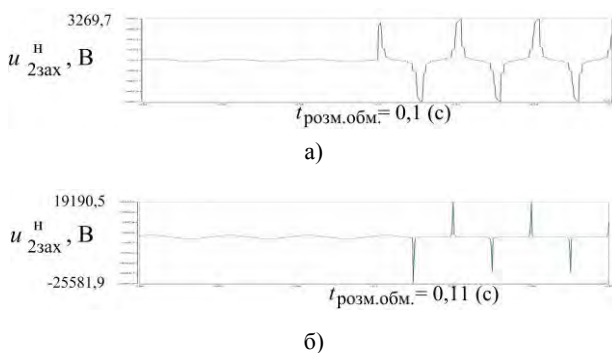


Рис. 6. Осцилограми напруги на виводах вторинної релейної обмотки каскадного ТС:

а) $I_1 = I_{1\text{ном}} = 2000 \text{ A}$; б) $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{ном}} = 20000 \text{ A}$

Як бачимо з отриманих осцилограм, амплітуди вторинних напруг трансформаторів верхнього та нижнього ступенів у доаварійному режимі відповідно сягають значень: $U_{2\text{мах}}^B = 29,04 \text{ В}$, $U_{2\text{вим}}^H \text{ мах} = 41,74 \text{ В}$, $U_{2\text{зах}}^H = 100,8 \text{ В}$. Такі рівні напруг не становлять небезпеки для ізоляції вторинних кіл ТС та засобів захисту обслуговуючого персоналу від електричного ураження.

За розмикання вторинних обмоток ступенів напруга на їх виводах значно зростає порівняно із доаварійним режимом і стає несинусоїдною. Така форма кривої вторинної напруги обумовлена трапецеювидною зміною кривої результуючого магнітного потоку в осерді відповідного ступеню внаслідок його насичення.

Вже за номінального первинного струму амплітуди напруг на розкорочених вторинних виміральної та релейній обмотках каскадного ТС сягають відповідно значень 2916,3 В та 3269,7 В, а для трансформатора верхнього ступеню – 5782,2 В.

Такі рівні перенапруг безумовно є недопустимими з погляду ізоляційних характеристик вторинних кіл ТС та становлять загрозу життю обслуговуючого персоналу під час проведення ним ремонтних та налагоджувальних робіт у цих колах.

Згідно [3] ТС, у яких амплітуда напруги на розімкненій вторинній обмотці за номінального первинного струму перевищує значення 350 В, повинні мати напис: «Увага. Небезпечно. На розімкненій обмотці висока напруга».

Варто відмітити, що за розмикання вторинної обмотки ТС під час проходження синусоїди первинного струму через нуль на її виводах спостерігається лише періодична несинусоїдна напруга. Обрив же вторинного кола на проміжку зростання первинного струму до свого амплітудного значення супроводжується виникненням початкового високовольтного імпульсу напруги, амплітуда якого залежить від миттєвого значення первинного струму у момент розмикання вторинної обмотки та може значно перевищувати амплітуду усталеної періодичної несинусоїдної вторинної напруги.

На Рис.7 наведено осцилограми напруг на розімкнених виводах вторинної виміральної обмотки залежно від миттєвого значення номінального первинного струму досліджуваного каскадного трансформатора ТФЗМ-500. Розкорочення вторинного кола проводилося: у момент проходження синусоїди первинного струму через нуль, на проміжку зростання синусоїди первинного струму від нуля до амплітудної величини та у момент проходження синусоїди первинного струму через свій максимум.

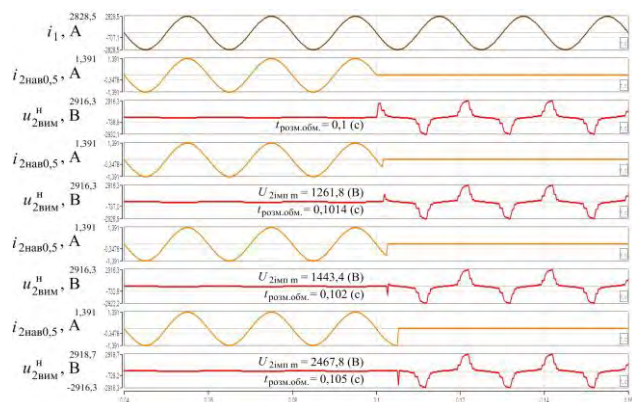


Рис. 7. Осцилограми напруг на розімкнених виводах вторинної виміральної обмотки залежно від миттєвого значення номінального первинного струму ТС.

На Рис.7 наведено такі осцилограми: $i_1(t)$ – осцилограма первинного струму досліджуваного каскадного трансформатора ТФЗМ-500; $i_{2\text{нав}0,5}(t)$ – осцилограма вторинного струму виміральної обмотки ТС; $u_{2\text{вим}}^H(t)$ – осцилограма вторинної напруги виміральної обмотки ТС. Також вказується час розмикання обмотки $t_{\text{розм.обм.}}$ і відповідна цьому режиму амплітуда початкового високовольтного імпульсу $U_{2\text{імпл}}^H$.

Як бачимо, амплітуда початкового імпульсу напруги за розкорочення вторинної обмотки трансформатора у момент проходження синусоїди первинного струму через свій максимум перевищує значення двох кіловольт.

Отримані результати дають загальну характеристику аварійного режиму роботи досліджуваного каскадного ТС типу ТФЗМ-500.

Під час проведення робіт обслуговуючим персоналом у вторинних колах ТС основним захистом від перенапруг на сьогоднішній день є закорочення вруч-

ну виводів вторинної обмотки спеціальними перемичками [4]. Однак цей метод використовується лише у разі наміреного розриву вторинних кіл персоналом для проведення ремонту чи налагодження вторинної апаратури. Після закінчення робіт вторинні кола під'єднуються до ТС і перемичка знімається.

Ручне встановлення перемички обумовлює небезпеку електричного ураження обслуговуючого персоналу у разі непередбачуваного попереднього обриву цих кіл.

Тому основним завданням є створення таких пристроїв захисту ТС від перенапруг, які б унеможливили їх виникнення як за нормальних перемикань, так і під час аварійних пошкоджень вторинного обладнання.

III. Система захисту ТС від вторинних перенапруг

З метою захисту від дії небезпечних перенапруг за розмикання вторинних кіл ТС запропоновано використання спеціальної системи захисту, побудованої на мікропроцесорному принципі (СЗТС), спрощена блок-схема якої наведена на Рис.8.

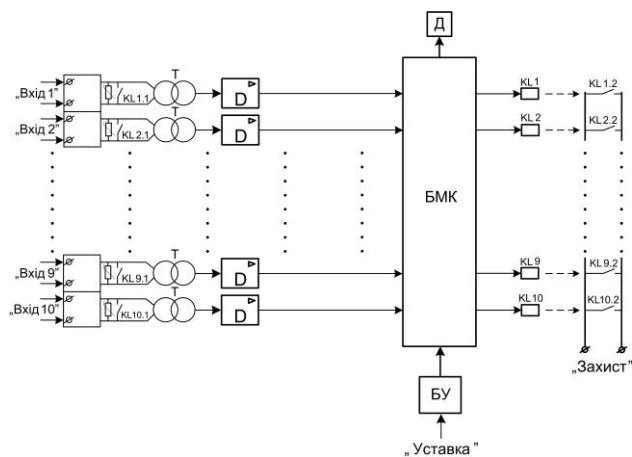


Рис. 8. Блок-схема СЗТС

На входи системи поступає інформація про величини напруг на виводах вторинних обмоток всіх ТС, встановлених на підстанції. Ця напруга через розділовий трансформатор Т подається на вхід операційного підсилювача D, а далі – до блоку мікроконтролера БМК. Останній порівнює одержану напругу із величиною напруги «Уставки». Якщо ця напруга менша за величину напруги уставки, то СЗТС не виконує жодних функцій та працює в режимі очікування.

Якщо ж напруга на якомусь вході БМК перевищить напругу уставки, то він формує керуючий імпульс на спрацювання відповідного реле KL. При цьому контакти 1 реле закорочують вторинну обмотку відповідного ТС, а контакти 2 подають команду на спрацювання звукової сигналізації «Обрив вторинних кіл».

Для захисту від першого піку перенапруги паралельно входам СЗТС підключені обмежувачі

перенапруг (ОПН). Вони забезпечуватимуть захист від перенапруг до моменту замикання контактів 1 відповідного реле.

На дисплей Д виводиться інформація від блоку управління БУ про налаштування та спрацювання системи захисту.

СЗТС забезпечить ефективний захист персоналу та електрообладнання від дії вторинних перенапруг, що, безумовно, підвищить рівень надійності та безпеки експлуатації вимірювальних ТС.

Висновки

1. Наведена розрахункова схема каскадного трансформатора ТФЗМ-500 дозволяє моделювати та аналізувати різні режими його роботи. При цьому легкість програмування та зміни параметрів схеми у програмному середовищі забезпечує можливість дослідження й інших типів каскадних двоступеневих ТС.

2. Отримані результати свідчать про небезпечні рівні перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток ступенів ТС ТФЗМ-500. Так, вже за номінального первинного струму амплітуди вторинних напруг каскадного трансформатора сягають значень 2916,3 В для вимірювальної обмотки та 3269,7 В для релейної обмотки, а для трансформатора верхнього ступеню – 5782,2 В.

3. Наведена система захисту ТС від перенапруг за обриву їх вторинних кіл не допускати розвитку аварійних процесів і тим самим забезпечувати безпечну експлуатацію ТС.

References

- [1] A. V. Zhurakhivskiy, B. M. Kinash, A. Ya. Yatseiko, R. Ya. Ferensovych, "Analiz rezhymiv roboty vtorynnykh kil transformatoriv strumu za yikh rozkorochnnia" ["Analysis modes of working secondary circuits of current transformers after their disconnection"], *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika"* – Electricity and electromechanical systems. Herald of Lviv Polytechnic National University, no. 736, pp. 43-49, 2012.
- [2] A. A. Preobrazhenskij, E. G. Bishard, *Magnitnye materialy i jelementy* [Magnetic materials and elements]. Edition 3. Moskva: Vysshaja Shkola Publ., 1986, p. 352.
- [3] V. V. Afanas'ev, N. M. Adon'ev, V. M. Kibel' i dr., *Transformatory toka* [Current transformers]. Edition 2. Leningrad: Jenergoatomizdat. Leningradskoe otdelenie Publ., 1989, p. 416.
- [4] Normatyvnyi dokument. SOU-N MPE 40.1.35.301: 2004. *Perevirka transformatoriv strumu, yaki vykorystovuiutsa v skhemakh releinoho zakhystu. Instruksiiia* [The normative document. SOU-N MPE 40.1.35.301: 2004. Testing of current transformers that are used in circuits of relaying. Instruction]. Kyiv, 2005, p. 71.