

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ В ОДНОФАЗНОМУ ДВОХОБМОТКОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ

© Дмитрик Б. В, Равлик О. М., 2015

**Розроблено новий спосіб ідентифікації виткових замикань у силових трансформаторах із сухою ізоляцією.**

*Ключові слова: виткове замикання, суха ізоляція, двообмотковий трансформатор, неробочий хід, зовнішні короткі замикання.*

**A new method of identification of winding short circuits in power transformers with dry insulation was designed.**

*Key words: winding short circuit, dry insulation, double-winding transformer, off course, external short circuits.*

### Постановка проблеми

Сучасний розвиток електроенергетики передбачає впровадження все більшої кількості новітнього обладнання. Нині електроенергетична система України перебуває в перехідному стані: старіше обладнання виводять з роботи, хоч і доволі повільно, але здійснюється діагностика різноманітних режимів роботи новостворених електромереж, їх оптимізація, досліджуються супутні при цьому проблеми. Вирішення всіх цих проблем повинне бути спрямоване на якісне та безперервне постачання електроенергії споживачам. Сьогодні в розподільчих мережах до 35 кВ починають виводитись з роботи застарілі масляні силові трансформатори та з'являються сучасніші сухі трансформатори. Доволі великою проблемою і перших, і других є відсутність ефективного захисту від внутрішньовиткових замикань. У масляних трансформаторах він занадто повільно реагує, а в сухих і взагалі може бути відсутній. Виникає проблема створення ефективного та швидкодіючого захисту, яких би реагував на розвиток пошкодження на ранніх стадіях.

### Аналіз останніх досліджень

Як показав досвід експлуатації трансформаторів, одними з найнебезпечніших видів пошкоджень трансформаторів є внутрішньовиткові замикання (замикання між витками однієї обмотки). Такі пошкодження можуть спричинити обширну пожежу трансформатора. Відповідно пошкоджуються основні елементи обладнання. Якщо пошкоджену частину обмотки ще можна замінити, то магнітну систему трансформатора – ні. Таке обладнання стає непридатним до ремонту і його списують.

У масляних трансформаторах наявний газовий захист, що реагує на продукти розпаду масла в баку трансформатора за пожежі обмотки під час виткових замикань. Але цей захист не забезпечує швидкого реагування на поломку, оскільки виявляє вже наслідки пробою ізоляції обмоток. Часто аварія може розвинутиись настільки, що трансформатор вже не можна погасити, оскільки особливістю трансформаторної оливи є її надмірна горючість. Це може зумовити повне вигорання обмотки і оплавлення заліза магнітопроводу.

Через недоліки використання масла було створено трансформатори із сухою ізоляцією. Тут відсутні проблеми, пов'язані з використанням оливи. З іншого боку, стає видимою відсутність можливості встановлення газового захисту на трансформаторі, а отже, спеціалізованого захисту від виткових замикань немає. Зважаючи на це, компанія-виробник намагається унеможливити виникнення таких пошкоджень, удосконаленням ізоляції обмоток, але це не завжди допомагає.

Аналіз будови трансформатора показав, що він витримує значні перевантаження і перенапруги, але лише короткий проміжок часу. Отже, ізоляція обмоток не розрахована на тривале передавання понаднормової потужності. Дослідивши особливості роботи розподільчих мереж, було виявлено, що такі режими є доволі частими. Відповідно виникає небезпека виткових замикань у трансформаторі. Спроби застосування захистів на основі фотоелементів не дали очікуваних результатів. Знову ж таки, вони реагують на пізні стадії аварії, коли вже виникає електрична дуга, що охоплює багато витків обмотки.

### Постановка завдання

Запропоновано новий підхід до виявлення виткових замикань всередині силових двохобмоткових трансформаторів. Цей метод повинен виявляти замикання і великої кількості витків, і мінімально можливої. Для дослідів використовується математична модель двохобмоткового силового трансформатора, до якого підімкнене певне навантаження і в якому симулюються замикання з різною кількістю витків. Випробовують і за замикання у первинній, і у вторинній обмотках.

### Виклад основного матеріалу

Принципово виконання магнітопроводу і обмоток сухих трансформаторів практично не відрізняється від виконання цих частин у масляних трансформаторах. Різниця полягає лише у способі виконання ізоляції, охолодження та деяких конструктивних особливостях окремих частин. Тому метод ідентифікації виткових замикань сухих трансформаторів можна застосовувати і для масляних трансформаторів.

Для створення математичної моделі трансформатора було застосовано програмний комплекс «RE» [1]. Для її побудови достатньо паспортних даних, характеристики намагнічування магнітопроводу та кількості витків обмоток.

Ідентифікація виткових замикань ґрунтується на розумінні принципу роботи та основних законах, що описують електромагнітні процеси в трансформаторі. Для цього розглянемо однофазний двохобмотковий трансформатор. Систему рівнянь електромагнітного стану трансформатора можна записати у вигляді [2]:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ w_1 \cdot i_1 + w_2 \cdot i_2 - U_M(\Phi) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_1, u_2$  – напруги первинної та вторинної обмоток трансформатора;  $i_1, i_2$  – струми первинної та вторинної обмоток трансформатора;  $R_1, R_2, L_1, L_2$  – активні та індуктивні опори первинної та вторинної обмоток трансформатора;  $w_1, w_2$  – кількість витків первинної і вторинної обмоток трансформатора;  $\Phi$  – робочий магнітний потік;  $U_M(\Phi)$  – спад магнітної напруги у магнітопроводі трансформатора.

Система (1) описує стан електричних та магнітних кіл трансформатора: перше рівняння описує первинну обмотку, друге – вторинну, а третє – магнітопровід. Провівши певні математичні перетворення системи рівнянь (1), отримаємо:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{13} \cdot \frac{di_3}{dt} \\ u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{23} \cdot \frac{di_3}{dt} \\ M_{31} \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{32} \cdot \frac{di_2}{dt} - L_3(i_3) \cdot \frac{di_3}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$L_3(i_3) = -R'_M(\Psi_1)$ , де  $R'_M(\Psi_1)$  – відносний магнітний опір магнітопроводу, зведений до квадрата витків первинної обмотки, який можна отримати з характеристики неробочого ходу. Хоча

нелінійна характеристика магнітної вітки задається залежністю  $\Psi(i)$ , від неї можна перейти до потрібної нам залежності у вигляді  $L_3(i_3) = -R'_M(\Psi_1)$  за допомогою диференціювання.

Основна ідея ідентифікації виткових замикань полягає у реалізації системи рівнянь (2) на основі відомих параметрів трансформатора і миттєвих координат режиму. Оскільки виткові замикання в обмотці – це аварійний режим, можлива зміна певних параметрів у системі відносно заданих. Саме це покладено в основу виявлення виткових замикань. Основна проблема тут полягає у визначенні такого параметра, зміна якого буде чутлива тільки до виткових замикань і нечутлива до режиму увімкнення на неробочий хід, зміни режиму навантаження та зовнішніх коротких замикань.

Реалізація математичної моделі (2) для симулювання необхідних режимів здійснювалась на основі розрахункової схеми на рис. 1.

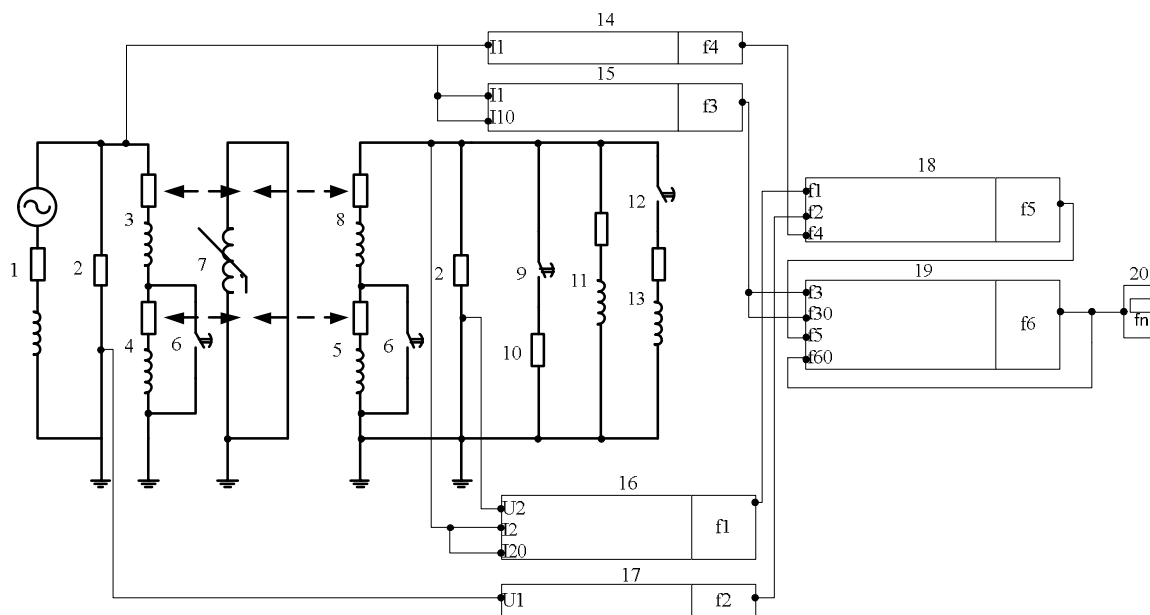


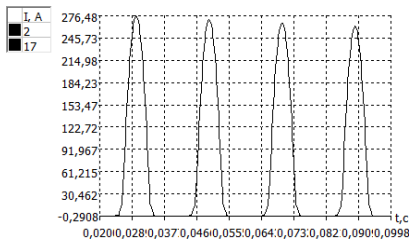
Рис. 1. Розрахункова схема симулювання виткових замикань для їх ідентифікації:

- 1 – параметри електромережі; 2 – опори для отримання первинної та вторинної напруг;
- 3, 8 – активні та реактивні опори первинної та вторинної обмоток трансформатора відповідно;
- 4, 5 – опори витків первинної та вторинної обмоток, що будуть замикатися;
- 6 – ключі для імітації виткових замикань в обмотках; 7 – опір магнітопроводу трансформатора;
- 9, 10 – вітка для імітації режиму зовнішнього короткого замикання; 11 – активний та реактивний опори навантаження трансформатора; 12, 13 – вітка для здійснення накиду навантаження потрібної величини;
- 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 – функціональні блоки програмного пакета для аналізу, оброблення та ідентифікації виткового замикання у трансформаторі

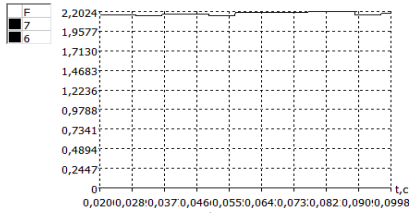
Для симулювання замикань з різною кількістю витків первинна і вторинна обмотки розбиті на декілька секцій. Алгоритм визначення параметра зміни під час виткових замикань реалізований на основі спеціальних функцій, входною інформацією для яких є миттєві значення струмів та напруг первинної і вторинної обмоток трансформатора.

Досліди проводили за найважчого з погляду ідентифікації режиму – замикання від одного до десяти витків первинної та від одного до трьох витків вторинної обмоток. Для перевірки правильності ідентифікації виконані розрахунки без і з витковими замиканнями для режиму увімкнення на неробочий хід (рис. 2, 5, 8), режиму навантаження (рис. 3, 6, 9) та зовнішнього короткого замикання (рис. 4, 7, 10).

Як видно з рис. 2, 3 і 4 параметр ідентифікації (що знаходиться у функції F6) залишається практично незмінним для всіх трьох режимів без виткових замикань і істотно змінює своє значення під час замикань і у первинній (рис. 5, 6, 7), і у вторинній (рис. 8, 9, 10) обмотках трансформатора незалежно від режиму.

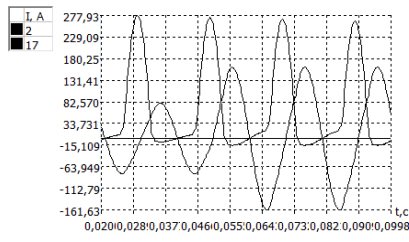


a)

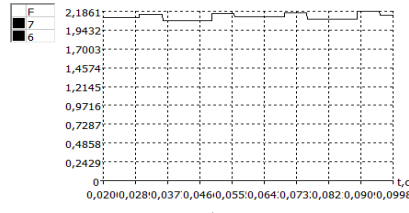


б)

*Рис. 2. Увімкнення на неробочий хід:  
а – струм первинної обмотки;  
б – параметр ідентифікації*

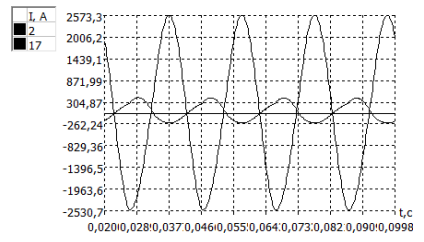


a)

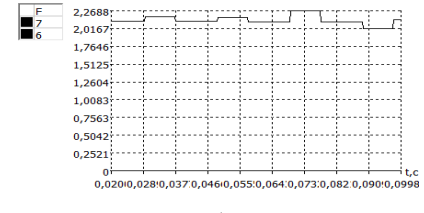


б)

*Рис. 3. Увімкнення на навантаження з подальшим його збільшенням вдвічі:  
а – струми у первинній і вторинній обмотках; б – параметр ідентифікації*

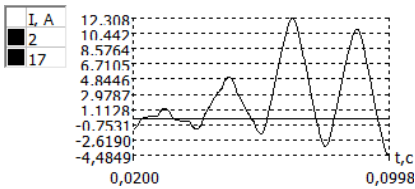


a)

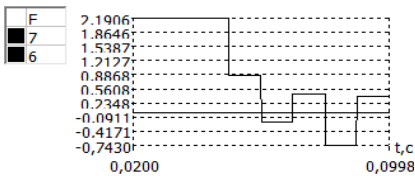


б)

*Рис. 4. Увімкнення на зовнішнє к.з.:  
а – струми у первинній і вторинній обмотках;  
б – параметр ідентифікації*

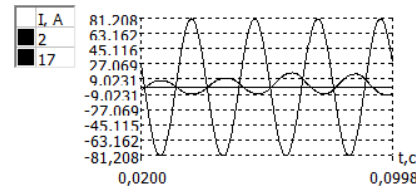


a)

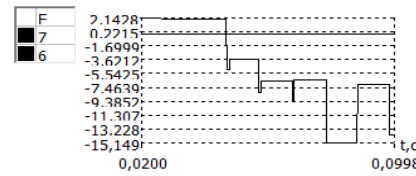


б)

*Рис. 5. Розвиток виткового замикання у первинній обмотці трансформатора під час неробочого ходу:  
а – струм первинної обмотки;  
б – параметр ідентифікації*

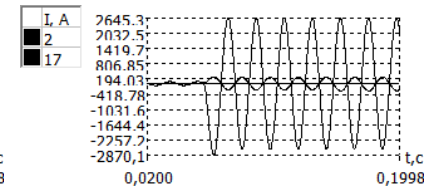


a)

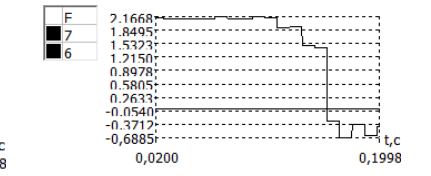


б)

*Рис. 6. Розвиток виткового замикання у первинній обмотці трансформатора під час режиму навантаження:  
а – струми у первинній і вторинній обмотках; б – параметр ідентифікації*

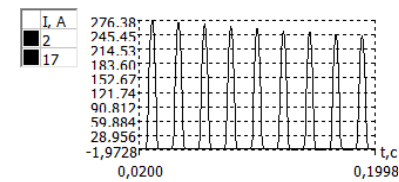


a)



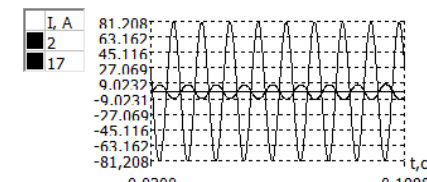
б)

*Рис. 7. Розвиток виткового замикання у первинній обмотці трансформатора під час зовнішнього к.з.:  
а – струми у первинній і вторинній обмотках; б – параметр ідентифікації*



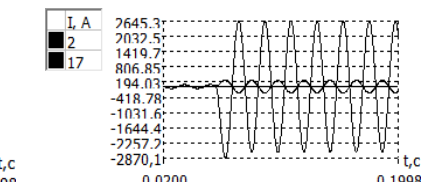
a)

*Рис. 8. Розвиток виткового замикання у вторинній обмотці трансформатора під час увімкнення на неробочий хід:  
а – струм первинної обмотки*



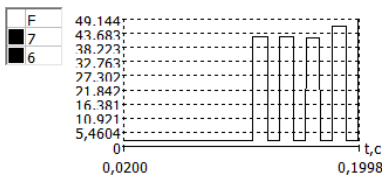
a)

*Рис. 9. Розвиток виткового замикання у вторинній обмотці трансформатора під час режиму навантаження:  
а – струми у первинній і вторинній обмотках*



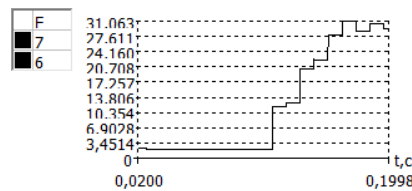
a)

*Рис. 10. Розвиток виткового замикання у вторинній обмотці трансформатора під час зовнішнього к.з.:  
а – струми у первинній і вторинній обмотках*



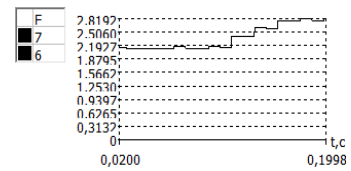
б)

Рис. 8. (Продовження). Розвиток виткового замикання у вторинній обмотці трансформатора під час увімкнення на неробочий хід: б – параметр ідентифікації



б)

Рис. 9. (Продовження). Розвиток виткового замикання у вторинній обмотці трансформатора під час режиму навантаження: б – параметр ідентифікації



б)

Рис. 10. (Продовження). Розвиток виткового замикання у вторинній обмотці трансформатора під час зовнішнього к.з.: б – параметр ідентифікації

### Висновки

На основі проведених досліджень можемо зробити такі висновки щодо ідентифікації виткових замикань у трансформаторах з сухою ізоляцією:

- отримані співвідношення і параметр, який дає змогу ідентифікувати виткові замикання обмоток двохобмоткового трансформатора з мінімальною кількістю витків;
- вибором відповідної уставки параметра можна забезпечити нечутливість алгоритму до зміни режиму навантаження, зовнішніх коротких замикань та режиму неробочого ходу;
- запропонований підхід до ідентифікації виткових замикань у сухих трансформаторах може бути основою для розроблення пристрою захисту від них.

1. Равлик О. М., Гречин Т. М., Іваноньків В. Й. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики // Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1997. – № 340: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 96–101.
2. Равлик О. М. Комплексний підхід до формування математичних моделей елементів електричних мереж, пристроїв захисту й автоматики // Електротехніка і енергетика: Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. – 2008. – № 8(140). – С. 114–117.