

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. В роботі розглянуто методи випробування вимірювальних трансформаторів, які є ключовими елементами в електроенергетичних системах. Зазначено основні причини несправностей, такі як дефекти ізоляції, обмоток та магнітних сердечників, і запропоновано методи діагностики для їх виявлення. Проведено аналіз основних методів випробування, включаючи прямий і непрямий електричний підходи, випробування на основі моделювання, а також вимірювання параметрів точності трансформаторів. Особлива увага приділяється використанню моделювання для оцінки технічного стану та точності роботи трансформаторів. Висновки підкреслюють важливість розробки нових підходів до випробувань вимірювальних трансформаторів для забезпечення їхньої надійності, безпеки та відповідності технічним характеристикам.

Ключові слова: вимірювальні трансформатори, діагностування, вимірювання.

Abstract. The abstracts consider the methods of testing instrument transformers, which are key elements in power systems. The main causes of faults, such as insulation, winding and magnetic core defects, are indicated, and diagnostic methods for their detection are proposed. The main test methods are analyzed, including direct and indirect electrical approaches, simulation-based testing, and measurement of transformer accuracy parameters. Special attention is paid to the use of simulation to assess the technical condition and accuracy of transformers. The conclusions emphasize the importance of developing new approaches to instrument transformers testing to ensure their reliability, safety and compliance with technical specifications.

Keywords: instrument transformers, diagnostics, measurement.

Вступ

Вимірювальні трансформатори (ВТ) є одним із ключових елементів безпечної та безперебійної системи електропостачання, виконуючи роль сполучної ланки між первинним і вторинним обладнанням. Випробування ВТ надзвичайно важливі, оскільки дозволяють перевірити якість їхнього складання під час виробництва, установки, налагодження та введення в експлуатацію, а також впевнитися, що трансформатори функціонують відповідно до технічних характеристик. Для підвищення ефективності виробництва та забезпечення високої якості складання і роботи ВТ важливо проводити вимірювання протягом усього життєвого циклу трансформаторів [1-3].

Основними задачами діагностування ВТ є виявлення дефектів і пошкоджень, оцінка функціональної справності обладнання, визначення можливостей продовження терміну експлуатації без проведення ремонтних робіт, визначення об'єму ремонту при його необхідності, оцінка залишкового терміну служби, а також створення рекомендацій щодо продовження терміну служби [4].

Результати дослідження

В результаті дослідження було встановлено [5-7], що типовими причинами збоїв у роботі ВТ (рис. 1) є:

- > заводські дефекти (найчастіше пов'язані з магнітним сердечником, системою ізоляції чи коефіцієнтом трансформації (КТ));
- > дефекти виробництва (обриви ланцюга, коротке замикання (КЗ), пробій ізоляції);
- > робота не відповідає технічним характеристикам (занадто низьке/високе навантаження, неправильні показники струму/напруги);

- > електричні дії (комутаційна або електрична перенапруга, струм КЗ);
- > зношення/старіння/корозія (волога, кислоти, кисень, забруднення, витік).



Рис. 1 – Загальний вигляд вимірювальних трансформаторів: а) струму; б) напруги; в) ємнісний трансформатор напруги

Розглянемо основні компоненти ВТ та причини їх несправності (табл. 1).

Таблиця 1 - Компоненти вимірювальних трансформаторів та їх несправності

		Точність (похибка КТ та кутова похибка)	Коефіцієнт трансформації / похибка коефіцієнта трансформації	Полярність	Характеристики намагнічування	Опір обмотки	Навантаження	Аналіз часткових розрядів	Аналіз діелектричного (частотного) відгуку обмоток	Вимірювання коефіцієнта потужності/тангенсу кута діелектричних втрат	Гранична кратність струму (ALF) та напруга на виводах (Ub)	Вимірювання залишкової індукції	Параметри ТС при перехідних процесах
Компонент	Несправності	Можливі методи вимірювання											
Ізоляція	Часткові розряди							■					
	Волога в паперовій ізоляції								■				
	Старіння, підвищена вологість, забруднення ізоляційної рідини								■	■			
	Дефекти в ємнісних шарах системи вирівнювання потенціалів									■			
Обмотки	Коротке замикання (міжвиткове)	■ ¹	■		■ ²	■							

	Обрив ланцюга	■ ¹	■		■ ²	■							
	Проблеми з контактами	■ ¹	■			■							
Сердечник	Механічна деформація	■ ¹			■ ²								
	Плаваюче заземлення сердечника												
	Ослаблення затискачів												
	Магнітне коротке замикання	■	■										
	Попереднє намагнічення/залишкова намагніченість											■	
Ємнісний дільник напруги	Частковий пробій окремих ємнісних шарів	■ ¹	■										
Компенсаційний реактор (тільки комбіновані ВТ)	КЗ у витках	■ ¹											
Все електромагнітне коло	Точність (похибка КТ та кутова похибка)	■											
	Похибка коефіцієнта трансформації (повна)	■	■								■		
	Полярність	■	■	■									
	Неправильна номінальна потужність ВТ	■	■								■		■
Навантаження	Неправильне номінальне значення					■							■
	Неправильне або несправне з'єднання між ВТ та лічильником / реле			■		■							

Примітка: ■¹: несправності знижують точність ВТ; ■²: виявити ці несправності часто дуже складно, вони стають очевидними лише за порівняння показників із попередніми результатами вимірів.

Серед основних методів випробувань вимірювальних трансформаторів виділяють:

- *прямий електричний метод випробування* (первинні величини (напруга/струм) подаються на первинну (ВН) сторону ВТ, а потім на вторинній (НН) стороні вимірюються відповідні значення. Визначаються такі параметри, як коефіцієнт трансформації, похибка, полярність тощо. Під час вимірювання похибки до ВТ необхідно підключати різне навантаження, щоб врахувати у розрахунках вплив на роботу трансформатора. Може застосовуватися як до стандартних, і до нестандартних ВТ. Цей вид випробувань з номінальним струмом/напругою є обов'язковим під час заводських випробувань ВТ);

- *подача номінального струму/напруги на первинну обмотку* (використовуються випробувальні сигнали з номінальним значенням (струм/напруга). Під час вимірювання до ВТ підключено робоче навантаження. Цей метод використовується в калібрувальних лабораторіях, а іноді і на місці експлуатації, де випробувальне обладнання високої точності монтується на величезні платформи. Випробувальні системи, як правило, громіздкі та важкі, перевозити їх дорого та клопітно, тому вони не дуже підходять для тестування на місці експлуатації);

- *подача сигналів на первинну обмотку* (у цьому випробуванні первинне обладнання подаються перевіірочні сигнали напруги чи струму (необов'язково номінальні значення). Випробування застосовується лише для перевірки роботи ВТ та не підходить для калібрування чи перевірки класу трансформатора (нелінійність ВТ). Для випробування нестандартних вимірювальних трансформаторів можуть бути застосовані сигнали невеликої амплітуди відповідно до даних виробника про нелінійність ВТ. Як правило, для випробувань використовуються переносні системи, та їх точність

зазвичай обмежена. Отже, цей метод цілком підходить для пусконаладжувальних випробувань дома експлуатації устаткування);

- *непрямий електричний метод випробування* (за цим методом виміру виконуються з вторинної сторони, а випробувальні сигнали відрізняються від первинних значень. Цей метод застосовується до стандартних ВТ (ТС, ТН, ТСН));

- *подача напруги на вторинну обмотку* (спеціальне випробування для трансформаторів струму з напругою на вторинну сторону. Випробувальна напруга дорівнює робочій напрузі на вводах при номінальному навантаженні. Вимірювання кривої намагнічування виконується відповідно до міжнародних стандартів. Для визначення повної похибки необхідно подати напругу відповідно до конкретних умов роботи ТС, виміряти відповідний струм намагнічування та розрахувати похибку. Важливою перевагою цього випробування є застосування компактної та легкої випробувальної системи (замість громіздкого обладнання для подачі первинного струму), яку можна легко доставити на місце експлуатації);

- *випробування на основі моделювання* (для подачі сигналів з низькими значеннями, які використовуються у цьому випробуванні, створюються компактні легкі та безпечні прилади. За цим методом вимірювальні трансформатори моделюються з використанням їх еквівалентних схем (ЕС). На основі всіх виміряних та виявлених параметрів ЕС розраховують необхідні значення ВТ, такі як точність, коефіцієнт трансформації та полярність. Метод може використовуватися як для калібрування, так і для діагностики обладнання, оскільки параметри ЕС забезпечують точну інформацію про пристрій і навіть дозволяють визначити ключову причину відмови. Крім того, завдяки точним приладам такі випробування можна проводити як у лабораторії, так і та на місці експлуатації). Схема випробування на основі моделювання показана на рис. 2.

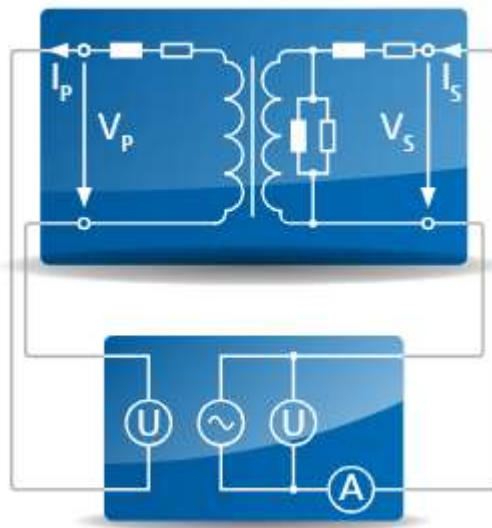


Рисунок 2 - Випробування на основі моделювання

Вимірювання дозволяють оцінювати справність вимірювального трансформатора, як частини надійної, безпечної та економічно вигідної системи електропостачання. Завдяки точній роботі ВТ вторинні ланцюги підстанції обтікаються струмами та напругами, пропорційними первинним. В індуктивних трансформаторах струму та напруги (ТС і ТН) та ємнісних трансформаторах напруги (ЄТН) можуть з часом виникати відхилення від коефіцієнта трансформації та коливання фазового кута. У ході роботи, під впливом різних навантажень, струмів і напруг, в ВТ можуть змінитися значення похибки коефіцієнта трансформації та зсуву фаз, що вплине на здатність трансформатора виконувати свої функції відповідно до заявленої точності. Крім того, такі дефекти, як КЗ у витках трансформаторів струму і пробій ємнісних шарів пакетному конденсаторі ЄТН, часто залишаються непоміченими. Все

це призводить до помилок показників, фінансових збитків, а іноді й до повної відмови обладнання. Вимірювання точності можна проводити на етапі виробництва, у випробувальних лабораторіях або при експлуатації. Точність роботи трансформатора (похибка КТ та зсув фази) визначається методом моделювання. Моделюється ВТ за його еквівалентною схемою із застосуванням вбудованих математичних алгоритмів. Параметри ланцюга визначаються за результатами напівавтоматичних вимірювань дома експлуатації устаткування з подачею низьковольтного напруги. Потім, на основі вимірних параметрів та з урахуванням режиму навантаження, розраховується похибка трансформатора.

Висновок

В результаті проведеного дослідження встановлено, що метод на основі моделювання дозволяє врахувати та змоделювати вплив різних навантажень та робітників діапазонів на точність роботи трансформатора. Вимірювання точності можна також виконувати з подачею первинних сигналів із підключеним навантаженням. У стандартних випробуваннях використовуються струм і напруга більших величин. Вимірювання точності на основі моделювання можуть застосовуватись для подальшої діагностики трансформаторів, особливо ТСН. Крім вимірювання похибки КТ та фазового зсуву, випробування дає можливість визначити параметри ланцюга. Проаналізувавши ці параметри можна виявити основну причину зниження точності трансформатора. Оскільки метод передбачає використання струму та напруги виключно малих амплітуд, вимірювання можна проводити навіть на етапі виробництва при відсутності основної ізоляції. Користувачі можуть переносити вимірні параметри ВТ програм мережевого моделювання для обліку реального поведінки трансформаторів струму та напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang, W., Ma, G., Liu, H., Wang, L., Fan, Z., & Hou, D. Fast Transient Measurement at Transformer Terminal Based on Built-In Capacitive Sensor. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020.
2. Малиновський А. А. Математична модель трансформатора напруги НОМ-10 для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі / А. А. Малиновський, С. Ю. Гушин, О. Л. Никонець // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2013. – № 763 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – с. 40-48.
3. Gutten, M., Frollo, I., & Klas, P. SFRA Method - Frequency Analysis of Transformers. Measurement 2009, Proceedings of the 7th International Conference, Smolenice, Slovakia.
4. Лагутін В. М., Тепля В. В., Нетребський В. В. Удосконалення випробувань вимірювальних трансформаторів в умовах експлуатації. Наукові праці Вінницького національного технічного університету, 2015, №2.
5. Kraetge, A., & Heindl, R. Experiences with the Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers. Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 2009.
6. Ding, L., Wang, Z., Jarman, P., & Darwin, A. A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Winding Deformation Detection. Electric Power Components and Systems, 2012.
7. Birlasekaran, S., & Karthikeyan, S. Diagnostic Methods of Frequency Response Analysis for Power Transformer Winding Deformation Detection. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2015.
8. ДСТУ ІЕС 60044-2:2008. «Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Трансформатори напруги індуктивні». – Вв. 2010 – 01 – 01. – К.: Держспоживстандарт України. – 2010. – 34 с.
9. ДСТУ ГОСТ 23625-2003. «Трансформатори напруги вимірювальні лабораторні. Загальні технічні умови». – Вв. 2003 – 07 – 01. – К.: Держспоживстандарт України. – 2003. – 20 с.

Юлія Володимирівна Малогулко — к.т.н., доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net.

Ситар Олексій Олексійович – студент групи ЕСМ-23м, Факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: sytar.oleksii@gmail.com

Juliya V. Malogulko — Ph.D., Assistant Professor of electrical stations and systems department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net.

Oleksiy O. Sytar - student of group ESM-23m, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sytar.oleksii@gmail.com/