

WYKRYWANIE USZKODZEŃ UZWOJEŃ TRANSFORMATORÓW METODĄ CZĘSTOTLIWOŚCIOWĄ

Jakub FURGAL¹, Maciej KUNIEWSKI²

1. Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel: (12) 617 37 61 fax: (12) 634 57 21, e-mail: furgal@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, student V roku, e-mail: m.kuniewski@gmail.com

Streszczenie: Transformatory energetyczne są poddawane szczegółowym badaniom diagnostycznym. Badania obejmują między innymi stan techniczny uzwojeń. Do wykrywania uszkodzeń uzwojeń stosowana jest metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej. Podstawą metody są charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia transformatorów.

W artykule przedstawiono badania wybranych uszkodzeń wewnętrznych uzwojeń transformatorów energetycznych na podstawie analizy odpowiedzi częstotliwościowej. Charakterystyki częstotliwościowe transformatorów wyznaczono przy zastosowaniu różnych metod.

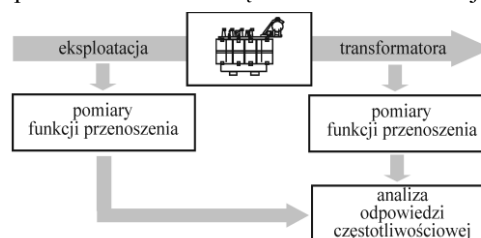
Słowa kluczowe: transformatory, badania uszkodzeń uzwojeń, metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej

1. WPROWADZENIE

Niezawodna praca transformatorów energetycznych ma duży wpływ na ciągłość dostaw energii elektrycznej. Transformatory energetyczne poddawane są szczegółowym badaniom diagnostycznym. Obejmują one swym zakresem także ocenę stanu technicznego uzwojeń.

Istotny wpływ na stan techniczny uzwojeń transformatorów mają siły elektrodynamiczne, generowane podczas przepływu prądów zwarciovych, powodujące zniekształcenia lub przemieszczenia uzwojeń. Siły powstające podczas zwarć są skierowane wzdłuż promienia uzwojenia, oddziałują na uzwojenie zewnętrzne na zewnątrz, a na uzwojenie wewnętrzne - do wewnątrz. Konsekwencją tych sił są przemieszczenia promieniowe oraz rozciąganie lub ściskanie uzwojeń. Na uzwojenia oddziałują również siły osiowe. Są one przyczyną zmian wysokości uzwojeń w wyniku zwiększania odstępów między zwojami lub przemieszczeń osiowych uzwojeń. Działanie sił mechanicznych może być przyczyną obniżenia wytrzymałości elektrycznej wewnętrznych układów izolacyjnych. Na uszkodzenia są podatne szczególnie układy izolacyjne transformatorów po długim czasie eksploatacji. Wytrzymałość mechaniczna izolacji papierowej takich transformatorów jest znacznie zmniejszona wskutek długotrwałych procesów starzeniowych. Uszkodzenia układów izolacyjnych mogą być przyczyną zwarć wewnętrznych w uzwojeniach powodujących przepływ dużych prądów [1,2].

Badania, mające na celu identyfikację uszkodzeń uzwojeń transformatorów, są wykonywane głównie przy zastosowaniu metody analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA - ang. *Frequency Response Analysis*). Podstawą metody są wyniki rejestracji funkcji przenoszenia transformatorów [3-6]. Badania mają charakter porównawczy. Aktualne charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia transformatora są porównywane z charakterystykami odniesienia, którymi mogą być charakterystyki wyznaczone wcześniej dla badanego transformatora (rys. 1) lub dla jednostki bliźniaczej. Odmienne kształty porównywanych funkcji przenoszenia świadczą o uszkodzeniu uzwojenia.



Rys. 1. Schemat badań uszkodzeń uzwojeń transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA)

W artykule przedstawiono badania wybranych uszkodzeń uzwojeń transformatorów na podstawie charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia wyznaczanych różnymi metodami. Badania obejmowały identyfikację zwarć wewnętrznych w transformatorze oraz przesunięcia promieniowe uzwojeń względem kolumny rdzenia.

2. METODY WYZNACZANIA FUNKCJI PRZENOSZENIA TRANSFORMATORÓW

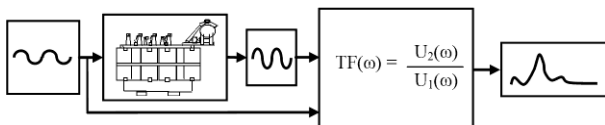
Funkcje przenoszenia transformatorów TF są definiowane, jako zależności częstotliwościowe ilorazów odpowiednich prądów lub napięć na zaciskach transformatora i napięcia zasilania:

$$TF(f) = \frac{u_2(f)}{u_1(f)} \quad (1)$$

gdzie: $u_1(f)$, $u_2(f)$ - odpowiednio napięcie zasilające uzwojenie górnego napięcia i napięcie indukowane w uzwojeniu niskiego napięcia transformatora [1,3-6].

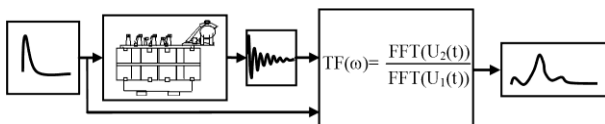
W przypadku, gdy prąd oraz napięcie odnoszą się do tego samego uzwojenia funkcja przenoszenia reprezentuje admitancję uzwojenia. Przedstawia ona poszczególne rezonanse i antyrezonanse odpowiadające biegunom i zerom funkcji przenoszenia. Zmiana kształtu uzwojeń znajduje swoje odzwierciedlenie w postaci zmian wewnętrznych pojemności, indukcyjności i rezystancji, a w konsekwencji przestrojeniem charakterystycznych częstotliwości rezonansowych admitancji.

Funkcje przenoszenia transformatorów można wyznaczać różnymi metodami. Jedną z nich polega na zasilaniu jednego uzwojenia napięciem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości i wykonaniu pomiarów wartości skutecznych odpowiednich prądów i napięć przy danej częstotliwości zasilania (*SFRA* – ang. *Sweep Frequency Response Analysis*). Na podstawie wyników pomiarów wykreślane są zależności częstotliwościowe funkcji przenoszenia (rys. 2) [5-6].



Rys. 2. Schemat blokowy metody wyznaczania zależności $TF(f)$ dla transformatorów przy zastosowaniu wymuszenia sinusoidalnego (*SFRA*)

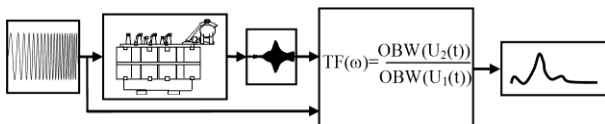
Podstawą drugiej metody wyznaczania funkcji przenoszenia transformatorów jest rejestracja napięć lub prądów w uzwojeniach generowanych przy wymuszeniu krótkotrwałym impulsem niskonapięciowym (*LVI* - ang. *Low Voltage Impulse*) [7,8] (rys. 3). W badaniach stosowane są udary napięciowe o wartościach maksymalnych w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset woltów. Udar napięciowy pojawiający się między zaciskami wejściowymi uzwojenia pierwotnego oraz napięcie indukowane w uzwojeniu strony wtórnej transformatora są rejestrowane przy zastosowaniu oscyloskopu szerokopasmowego. W celu transformacji rejestrowanych przebiegów do dziedziny częstotliwości korzysta się z algorytmu Szybkiej Transformaty Fouriera (*FFT* - ang. *Fast Fourier Transform*) [8].



Rys. 3. Schemat blokowy metody wyznaczania funkcji przenoszenia transformatorów $TF(f)$ przy zastosowaniu metody z użyciem krótkotrwałych impulsów napięciowych (*LVI*)

Metoda ta umożliwia wykonywanie badań uzwojeń w trybie on-line podczas pracy transformatorów przy wykorzystaniu przebiegów przepięć zarejestrowanych podczas wylądowań piorunowych lub czynności łączeniowych.

Funkcje przenoszenia transformatorów mogą być wyznaczone przy stosowaniu źródła napięcia sinusoidalnego o modulowanej częstotliwości (*SFM* - ang. *Sine Frequency Modulation*). Rejestrowane są przebiegi napięcia zasilającego oraz napięcia indukowanego w uzwojeniu sprzężonym. Charakterystyka częstotliwościowa funkcji



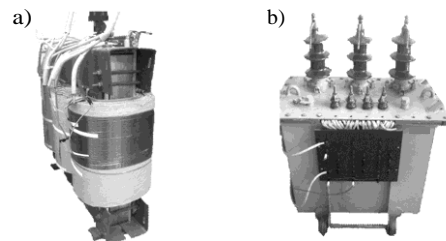
Rys. 4. Metoda wyznaczania funkcji $TF(f)$ transformatorów przy zastosowaniu źródła napięcia sinusoidalnego o modulowanej częstotliwości (*SFM*)

przenoszenia jest obwiednią napięcia lub prądu wymuszonego przez źródło napięcia sinusoidalnego o modulowanej częstotliwości (rys. 4) [8].

Stan techniczny uzwojeń transformatorów jest oceniany zwykle na podstawie analizy porównawczej funkcji przenoszenia z charakterystykami odniesienia. Podstawowe znaczenie praktyczne, umożliwiające identyfikację uszkodzeń, ma znajomość zależności między zmianami kształtów zależności częstotliwościowych funkcji przenoszenia a formą i zakresem zniekształceń uzwojeń.

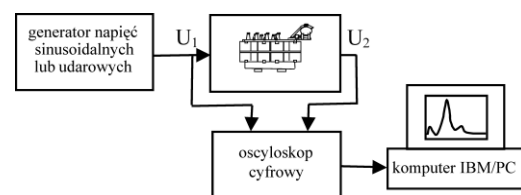
3. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW DOŚWIADCZALNYCH

Wykonano badania wybranych uszkodzeń uzwojeń transformatorów przy zastosowaniu metody analizy odpowiedzi częstotliwościowej. Obiektami doświadczalnymi były transformatory 250 kVA, 15/0,4 kV i 20 kVA, 15/0,4 kV (rys. 5). Uzwojenia górnego napięcia transformatora 250 kVA są wykonane jako warstwowe, a uzwojenia transformatora 20 kVA są uzwojeniami cewkowymi.



Rys. 5. Obiekty doświadczalne: a - transformator 250 kVA, 15/0,4 kV; b - transformator 20 kVA, 15/0,4 kV

Badania obejmowały zwarcia wewnętrzne oraz przesunięcia uzwojenia względem kolumny rdzenia. Funkcje przenoszenia $TF(f)$ wyznaczono, jako iloraz napięcia generowanego w uzwojeniu dolnego napięcia i sygnału zasilającego uzwojenie górnego napięcia. W wyznaczaniu charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia zastosowano metodę *SFRA*, metodę *LVI* i metodę *SFM*. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 6. Do zasilania układu pomiarowego do



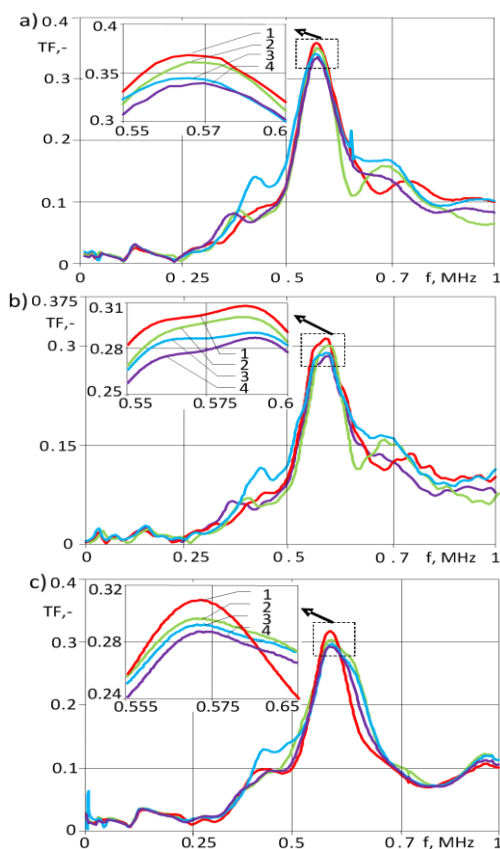
Rys. 6. Schemat układu do badań uszkodzeń uzwojeń transformatorów metodą *FRA*

wyznaczania funkcji przenoszenia transformatorów metodą *SFRA* zastosowano generator typu AFG 310, wytwarzający napięcie sinusoidalne o częstotliwości w zakresie od 50 Hz do 1 MHz. Układ pomiarowy do badań uszkodzeń uzwojeń metodą *LVI* zasilano przy użyciu generatora napięć udarowych o czasach 50/180 ns. Badania uszkodzeń transformatorów metodą *SFM* wykonano przy zastosowaniu układu pomiarowego zasilanego z generatora typu AFG 310, wytwarzającego napięcie sinusoidalne o modulowanej częstotliwości. W celu rejestracji przebiegów napięć stosowano oscyloskop cyfrowy firmy *Tektronix* typu TDS 784D. Do akwizycji wyników pomiarów użyto komputer klasy IBM/PC.

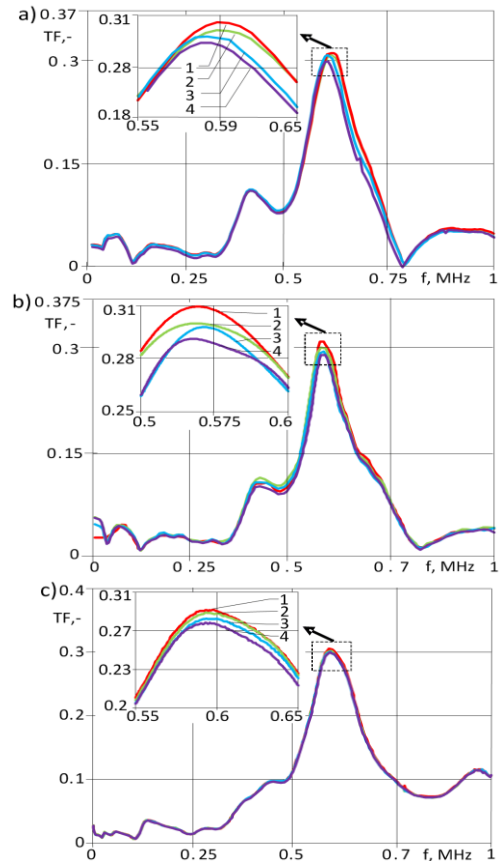
4. WYNIKI BADAŃ

Badania obejmowały uszkodzenia mające postać zwarcień wewnętrznych oraz przesunięć promieniowych uzwojeń względem kolumny rdzenia. Celem badań było wyznaczenie zależności między uszkodzeniami a zmianami charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia $TF(f)$ wyznaczonych różnymi metodami (rys. 2, 3 i 4). W kolejnych etapach badań zwierano części uzwojenia transformatora 250 kVA między kolejnymi zaciskami przełącznika zacsepów. Zwarcia obejmowały 1,2 %, 2,5 % i 3,5 % całkowitej liczby zwojów uzwojenia. W przypadku transformatora 20 kVA zwierano wybrane cewki uzwojenia górnego napięcia obejmujące 13,1 %, 27,2 % i 41,1 % ogólnej liczby zwojów. Drugi etap badań obejmował przesunięcia uzwojenia transformatorów wzdłuż promienia kolumny rdzenia. Odległość między wewnętrzną powierzchnią uzwojenia a kolumną rdzenia transformatora 250 kVA w kolejnych etapach przesuwania wzrastała odpowiednio o 2 mm, 5 mm i 8 mm. Kolejne przemieszczenia uzwojeń transformatora 250 kVA powodowały zwiększanie pojemności między uzwojeniem a rdzeniem o 4 %, 8 % i 12 %. Dla transformatora 20 kVA modelowano przemieszczenia poprzez zwiększanie pojemności pomiędzy rdzeniem a uzwojeniem kolejno o 2,5 %, 5 % i 7 %.

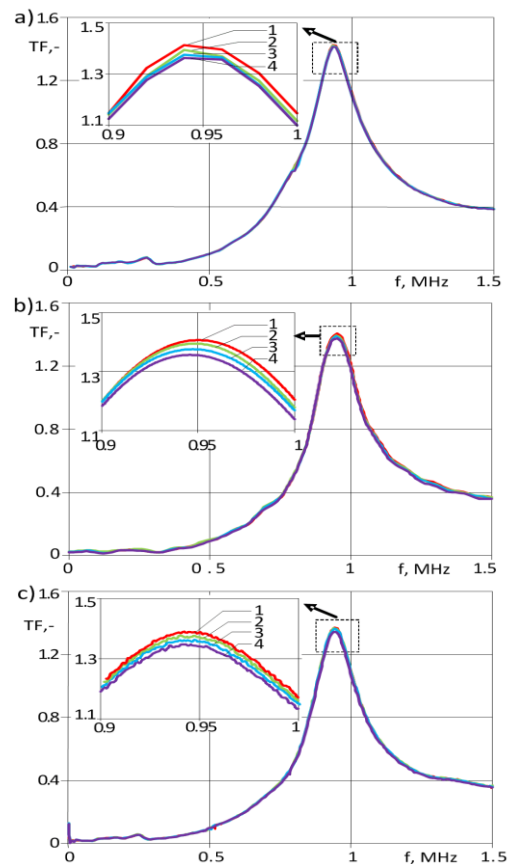
Zależności $TF(f)$ dla transformatora 250 kVA, wyznaczone przed i po zwarczeniach wewnętrznych w uzwojeniach górnego napięcia, przedstawiono na rysunku 7, a dla transformatora 20 kVA - na rysunku 9. Wyniki badań uszkodzeń uzwojeń, polegających na przesunięciach promieniowych uzwojenia względem kolumny rdzenia, dla transformatorów 250 kVA i 20 kVA zamieszczono odpowiednio na rysunkach 8 i 10.



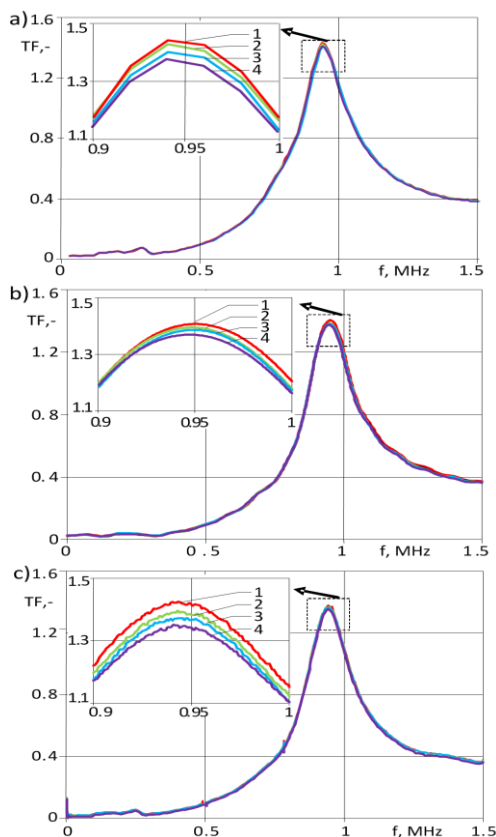
Rys. 7. Zależności $TF(f)$ uzwojenia transformatora 250 kVA, wyznaczone różnymi metodami, po zwarczeniu fragmentów uzwojenia górnego napięcia między kolejnymi zaciskami przełącznika zacsepów: a - metoda SFRA, b - metoda LVI, c - metoda SFM: 1 - bez zwarcia, 2,3,4 - zwarcie kolejno dwu, trzech i czterech zacisków przełącznika zacsepów



Rys. 8. Zależności $TF(f)$ uzwojenia transformatora 250 kVA, wyznaczone różnymi metodami, po przesunięciach promieniowych uzwojenia: a - metoda SFRA, b - metoda LVI, c - metoda SFM: 1 - bez przesunięcia, 2,3,4 - kolejne etapy przesuwania uzwojenia



Rys. 9. Zależności $TF(f)$ uzwojenia transformatora 20 kVA wyznaczone różnymi metodami po zwarczeniu kolejnych cewek uzwojenia górnego napięcia: a - metoda SFRA, b - metoda LVI, c - metoda SFM: 1 - bez zwarcia, 2,3,4 - zwarcie kolejno dwu, trzech i czterech cewek uzwojenia



Rys. 10. Zależności $TF(f)$ uzwojenia transformatora 20 kVA, wyznaczone różnymi metodami, po przesunięciach wzdłuż promienia kolumny rdzenia uzwojenia górnego napięcia: a - metoda SFRA, b - metoda LVI, c - metoda SFM: 1 - bez przesunięcia, 2,3,4 - kolejne etapy przesuwania uzwojenia

Na podstawie badań uzwojeń stwierdzono, że kształty charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia uzwojeń transformatorów doświadczalnych, wyznaczone z zastosowaniem różnych metod, są podobne, a charakter zmian krzywych, spowodowanych zwarciami wewnętrznymi jest taki sam. Różnice między wartościami maksymalnymi charakterystyk odniesienia wyznaczonych różnymi metodami są niewielkie. Zwarcie fragmentów uzwojeń znajduje swoje odzwierciedlenie w postaci zmian wartości maksymalnych funkcji przenoszenia. W miarę zwiększania liczby zwartych zwojów następuje zmniejszenie wartości maksymalnych funkcji przenoszenia. Zwarcia wewnętrzne w uzwojeniu nie powodują jednak zmian częstotliwości, przy której funkcje przenoszenia osiągają wartości maksymalne. Uszkodzenia uzwojeń, mające postać przemieszczeń uzwojeń względem kolumny rdzenia, powodują zmiany kształtów charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia. W miarę powiększania odległości pomiędzy uzwojeniem a rdzeniem wartości maksymalne funkcji przenoszenia maleją, natomiast częstotliwości, przy których funkcje przenoszenia osiągają wartości maksymalne, nie ulegają zmianie.

5. PODSUMOWANIE

Wykonane badania uszkodzeń uzwojeń metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej potwierdzają, że zastosowanie metody SFRA, z wykorzystaniem zasilania transformatora napięciem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości, metody LVI, z użyciem wymuszenia impulsem niskonapięciowym, oraz metody SFM, z zastosowaniem źródła napięcia sinusoidalnego o modulowanej częstotliwości, do wyznaczania funkcji przenoszenia daje zbliżone wyniki badań. Uszkodzenia uzwojeń takie jak zwarcia pomiędzy zwojami oraz przesunięcia promieniowe uzwojeń względem kolumny rdzenia znajdują swoje odzwierciedlenie w podobnych zmianach kształtów zależności częstotliwościowych funkcji przenoszenia wyznaczonych różnymi metodami. Największe zmiany kształtu funkcji przenoszenia występują w zakresie maksimów charakterystyk częstotliwościowych. Zwiększanie liczby zwieranych zwojów oraz powiększanie odległości uzwojenia od kolumny rdzenia powoduje zmniejszenie się wartości maksymalnych funkcji przenoszenia transformatorów.

LITERATURA

- [1] Leibfried T., Christian J., Feser K.: Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 18, No. 2, April, 2003, pp. 493 - 505
- [2] Kulkarni S.V., Khaparde S. A.: Transformer Engineering Design and Practice, Marcel Dekker, New York, 2004
- [3] Jeong S. C., Kim J. W., Park P., Kim S. W.: A Pattern-Based Fault Classification Algorithm for Distribution Transformers. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 20, No. 4, Oct. 2005, pp. 2483 - 2492
- [4] Nirgude P. M., Gunasekaran B., Rajkumar A. D., Singh B. P.: Investigations on Axial Displacement of Transformer Winding by Frequency Response Technique. XIVth Int. Symp. on High Voltage Eng., Beijing, China, Aug. 25 - 29, 2005, paper F - 47
- [5] Christian J., Feser K.: Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 19, No. 1, Jan., 2004, pp. 214 - 220
- [6] Florkowski M., Furgał J.: Detection of Transformer Windings Deformations Based on the Transfer Function - Measurements and Simulations. Meas. Scienc. and Technology, No. 14, 2003, pp. 1986 - 1992
- [7] Florkowski M., Furgał J.: Rozpoznawanie uszkodzeń uzwojeń na podstawie funkcji przenoszenia transformatorów. Przegl. Elektrot., ISSN 0033-2097, R. 83, Nr 12/2007, str. 60 - 63
- [8] El-Hajjar H., Wang Z. D., Sofian Z. D., Jarman P. N., Ryder S. A., Darwin A. W.: Analysis and Interpretation of FRA Measurement Results using Transfer Function Application on Large Power Transformers, 14th Int. Symp. on High Voltage Engin. ISH'2005, Beijing, China, 2005, paper G - 098

DETECTION OF FAILURES FOR TRANSFORMER WINDINGS BY USE OF THE FREQUENCY METHOD

Keywords: transformers, investigations of winding faults, frequency response analysis method

Power transformers are subjected to detailed diagnostic investigations. Investigations include among others technical condition of windings. To detection of windings failures is applied the frequency response analysis method (FRA). As a base of this method are the frequency dependences of transfer function of transformer winding. The investigations of selected internal failures of power transformer windings on the base of the frequency response analysis method are presented in the paper. Frequency characteristics of transformers were determined by use of different methods.