Jakub FURGAŁ*, Maciej KUNIEWSKI**

OCENA USZKODZEŃ UZWOJEŃ TRANSFORMATORÓW NA PODSTAWIE ODPOWIEDZI CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ WYZNACZANEJ METODĄ IMPULSOWĄ

STRESZCZENIE

Ocena stanu technicznego transformatorów energetycznych ma istotne znaczenie ze względu na funkcję, jaką transformatory spełniają w sieciach elektrycznych, oraz na ich koszt. Dlatego transformatory są poddawane szczegółowym badaniom diagnostycznym. Badania obejmują między innymi stan techniczny uzwojeń. W tym celu stosowana jest metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej, umożliwiająca wykrywanie uszkodzeń uzwojeń. Podstawą analizy są charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia transformatorów. Są one wyznaczane przy zastosowaniu różnych metod. Obecnie prace badawcze w tej dziedzinie są prowadzone w celu doskonalenia kryteriów rozpoznawania charakteru i zakresu zniekształceń uzwojeń badanych metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej.
W artykule przedstawiono badania wybranych uszkodzeń uzwojeń transformatorów energetycznych na podstawie analizy odpowiedzi częstotliwościowej wyznaczanej metodą impulsową.

Słowa kluczowe*: badania uzwojeń transformatorów, funkcja przenoszenia, metoda impulsowa*

ESTIMATION OF FAILURES OF TRANSFORMER WINDINGS ON THE BASE OF FREQUENCY RESPONSE DETERMINED BY USE OF IMPULSE METHOD

Estimation of technical state of power transformers have essential meaning with regard on the function of transformers in electrical networks and their costs. Therefore transformers are investigated in detail at exploitation conditions. Investigations include among others technical state of windings. To detection of winding failures the frequency response analysis method is used. As a base of analysis the frequency characteristics are used. They are determined by use of different methods. Nowadays scientific investigations in this area are made in purpose to improvement the criterions of character and range of winding deformations by use of the frequency response analysis method.
The investigations of selected failures of windings of power transformers on the base of analysis of frequency response determined by use of impulse method are presented in the paper.

Keywords*: investigations of transformer windings, transfer function, impulse method*

1. WPROWADZENIE

Stan techniczny transformatorów energetycznych ma duży wpływ na niezawodność dostaw energii elektrycznej. Transformatory pracujące w układach elektroenergetycznych poddawane są szczegółowym badaniom, w tym badaniom w celu oceny stanu technicznego uzwojeń. Właściwa ocena rodzaju i zakresu uszkodzeń uzwojeń transformatorów ma duże znaczenie praktyczne. Istotny wpływ na stan techniczny uzwojeń transformatorów mają siły powodujące zniekształcenia lub przemieszczenia uzwojeń, powstające podczas przepływu prądów zwarciowych. Zwarciom w sieciach elektrycznych, i związanych z nimi przepływom dużych prądów, towarzyszą siły elektrodynamiczne promieniowe. Działają one na uzwojenie zewnętrzne od wewnątrz, a na uzwojenie wewnętrzne – do wewnątrz. Ich konsekwencją są przemieszczenia promieniowe uzwojeń. W wyniku oddziaływania składowej promieniowej strumienia rozproszenia na uzwojenia działają siły skierowane wzdłuż osi rdzenia. Są one przyczyną zmian wysokości uzwojeń, w wyniku zwiększania odstępów między sekcjami lub zwojami lub przemieszczeń osiowych uzwojeń.

Uzwojenia są narażone również na oddziaływanie sił mechanicznych w czasie transportu transformatorów.

Działanie sił mechanicznych może być przyczyną obniżania wytrzymałości elektrycznej wewnętrznych układów izolacyjnych transformatorów. Szczególnie podatne na uszkodzenia są układy izolacyjne po długim czasie eksploatacji. Skutkiem procesów starzeniowych jest bowiem znaczne zmniejszenie wytrzymałości mechanicznej układów izolacyjnych papierowo-olejowych.

Podczas pracy transformatorów mogą występować zwarcia wewnętrzne w uzwojeniach na skutek lokalnych uszkodzeń układów izolacyjnych. Powodują one między innymi zmianę przekładni oraz lokalny wzrost temperatury spowodowany przepływem dużych prądów w pętlach zwartych w uzwojeniu.

Badania, mające na celu identyfikację uszkodzeń uzwojeń transformatorów, są wykonywane głównie przy zastosowaniu odpowiedzi częstotliwościowej, której podstawą są wyniki pomiarów funkcji przenoszenia [1–3]. W artykule przedstawiono badania uszkodzeń uzwojeń transformatorów na podstawie analizy odpowiedzi częstotliwościowej

* Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
** Studia doktoranckie Wydziału EAIiE AGH

wyznaczanej metodą impulsową. Badania obejmowały identyfikację zwarć wewnętrznych w uzwojeniach oraz przemieszczeń uzwojeń.

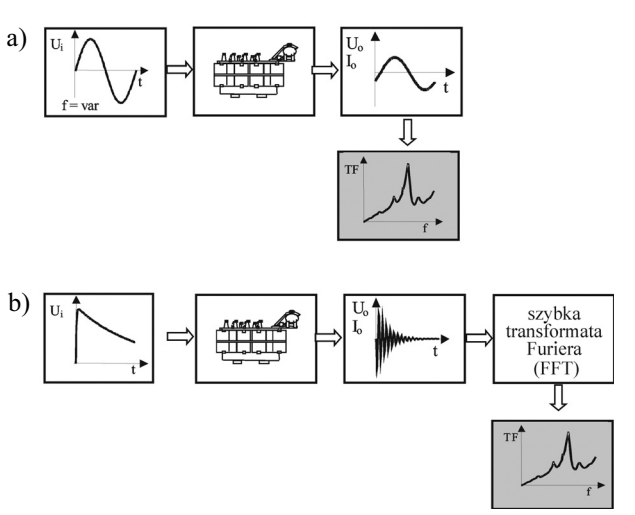
2. CHARAKTERYSTYKA METODY BADAŃ

W badaniach stanu technicznego uzwojeń metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej wykorzystywane są związki między uszkodzeniami a zmianami sprzężeń indukcyjno-pojemnościowych pomiędzy elementami uzwojeń. Zmiana kształtu uzwojenia, spowodowana przesunięciem zwoju, cewki lub całego uzwojenia bądź jego zniekształceniem lub zwarciem pomiędzy zwojami, jest przyczyną lokalnej zmiany pojemności lub indukcyjności rozproszenia. Wiąże się z tym zmiana kształtu funkcji przenoszenia uzwojenia.

Funkcje przenoszenia (*TF*) są definiowane jako zależności częstotliwościowe ilorazów odpowiednich prądów lub napięć na zaciskach transformatora do napięcia zasilania. W przypadku gdy napięcie i prąd odnoszą się do tego samego uzwojenia, wówczas funkcja przenoszenia reprezentuje admitancję *Y* uzwojenia [1, 2].

Przebiegi funkcji przenoszenia transformatora są zależne od jego budowy. Kształty funkcji przenoszenia uzwojeń różnych typów są odmienne i charakterystyczne dla danego typu. Zawierają szereg wierzchołków występujących przy częstotliwościach drgań własnych, wynikających z rezonansu szeregowego pomiędzy pojemnością a indukcyjnością rozproszenia uzwojenia.

Funkcje przenoszenia transformatorów są wyznaczane przy zastosowaniu dwu metod (rys. 1). Pierwsza z nich polega na zasilaniu badanego układu napięciem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości z generatora o przestrajanej częstotliwości (SFRA) (*Sweep Frequency Response Analysis*). Wykonywane są pomiary wartości skutecznych odpowiednich prądów i napięć przy danej częstotliwości zasilania oraz wykreślane są krzywe zależności częstotliwościowych funkcji przenoszenia [4, 5].



Rys. 1. Schemat blokowy metod wyznaczania funkcji przenoszenia transformatorów: a) metoda ze źródłem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości; b) metoda impulsowa

Podstawą drugiej metody wyznaczania funkcji przenoszenia jest rejestracja napięć lub prądów w uzwojeniach transformatorów generowanych przy wymuszeniu krótkotrwałym impulsem niskonapięciowym (LVI) (*Low Voltage Impulse*) [6, 7]. W celach diagnostycznych używane jest wymuszenie niskonapięciowe w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset woltów. Udar napięciowy pojawiający się między zaciskami wejściowymi uzwojenia pierwotnego u_{we} oraz napięcie indukowane w uzwojeniu strony wtórnej transformatora u_{we} są rejestrowane przy zastosowaniu oscyloskopu szerokopasmowego. Wyniki rejestracji napięć są podstawą wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia transformatora (rys. 2). Mogą być one wyznaczone przy zastosowaniu transformacji Fouriera wyrażonej wzorem:

$$u(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt \tag{1}$$

gdzie:

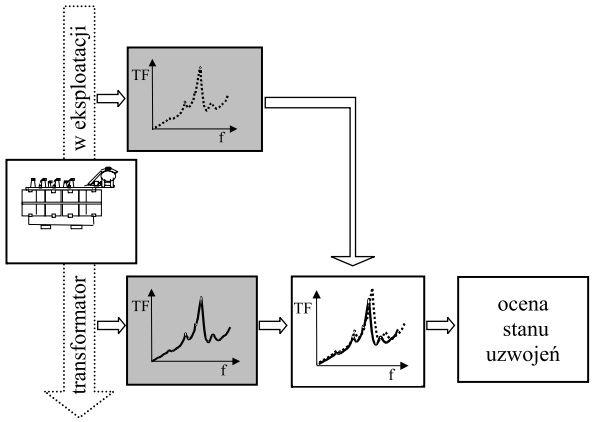
$u(j\omega)$ – zależność częstotliwościowa napięcia u_{we} (lub u_{wy}),

$u(t)$ – przebieg napięcia u_{we} (lub u_{wy}).

Efektem tej transformacji jest rozkład przebiegu $u(t)$ na sinusoidy o różnych amplitudach i częstotliwościach.

Metoda impulsu niskonapięciowego umożliwia prowadzenie badań online podczas pracy transformatorów na podstawie zarejestrowanych odpowiedzi dla udarów piorunowych lub łączeniowych (rys. 2).

Stan techniczny uzwojeń transformatorów jest oceniany zwykle na podstawie analizy wyników pomiarów funkcji przenoszenia, wykonanych w różnych okresach eksploatacji [8–10].



Rys. 2. Schemat blokowy badań uzwojeń metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej

W przypadku braku wyników pomiarów wykonanych przed uszkodzeniem wykorzystywana jest symetria konstrukcji transformatorów, i związana z nią symetria ich parametrów. W praktyce oznacza to porównanie funkcji

przenoszenia różnych faz tego samego transformatora. Możliwe jest również wykorzystanie i porównanie wyników pomiarów funkcji przenoszenia transformatorów o identycznej konstrukcji. Podstawowe znaczenie w identyfikacji uszkodzeń uzwojeń ma określenie wpływu uszkodzeń uzwojeń na zależności częstotliwościowe funkcji przenoszenia. Temu służą badania modelowe, wykonywane w laboratoriach z zastosowaniem rzeczywistych uzwojeń transformatorów oraz układów modelowych.

3. CHARAKTERYSTYKA METODY BADAŃ I OBIEKTÓW DOŚWIADCZALNYCH

W badaniach laboratoryjnych modelowano uszkodzenia uzwojeń transformatorów energetycznych o zróżnicowanych parametrach konstrukcyjnych i przy zastosowaniu metody impulsowej rejestracji funkcji przenosznia. Jako obiekty doświadczalne zastosowano transformatory o mocach 250 kVA i 20 kVA i napięciu znamionowym 15/0,4 kV. Uzwojenie transformatora 250 kVA zawiera czternaście warstw. Uzwojenie górnego napięcia transformatora 20 kVA jest uzwojeniem cewkowym, zawiera cztery cewki zwykłe oraz cztery cewki z izolacją wzmocnioną, ułożone po dwie na obu końcach uzwojenia (rys. 3, tab. 1).

Uszkodzenia miały postać przemieszczeń uzwojeń względem kolumny rdzenia oraz zwarć fragmentów uzwojeń.

Funkcje przenoszenia $TF(t)$ wyznaczono jako iloraz zależności częstotliwościowej napięcia generowanego w uzwojeniu dolnego napięcia u_{we} i krótkotrwałego udaru napięciowego o dużej stromości czoła zasilającego uzwojenie górnego napięcia u_{wy}. Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu wzoru:

$$TF(f) = \frac{u_{wy}(f)}{u_{we}(f)} \tag{2}$$

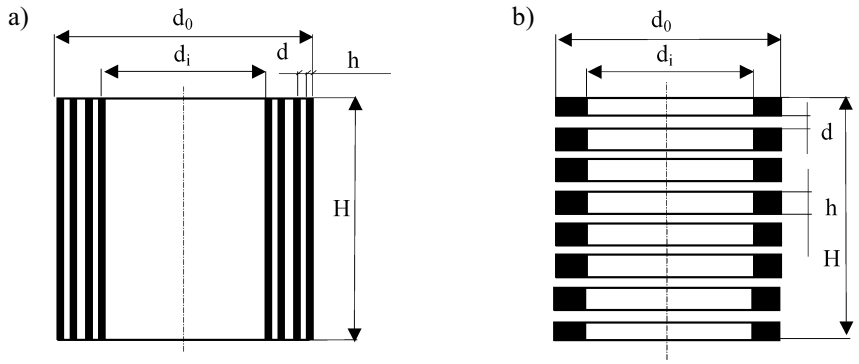
gdzie:

$u_{wy}(f)$ – napięcie indukowane w uzwojeniu dolnego napięcia transformatora,

$u_{we}(f)$ – udar napięciowy zasilający uzwojenie górnego napięcia.

Kształt krótkotrwałych udarów napięciowych stosowanych podczas badań jest określany niekiedy 50 ns/180ns. Czas narastania impulsu wynosi 50 ns, a czas do półszczytu 180 ns (rys. 4).

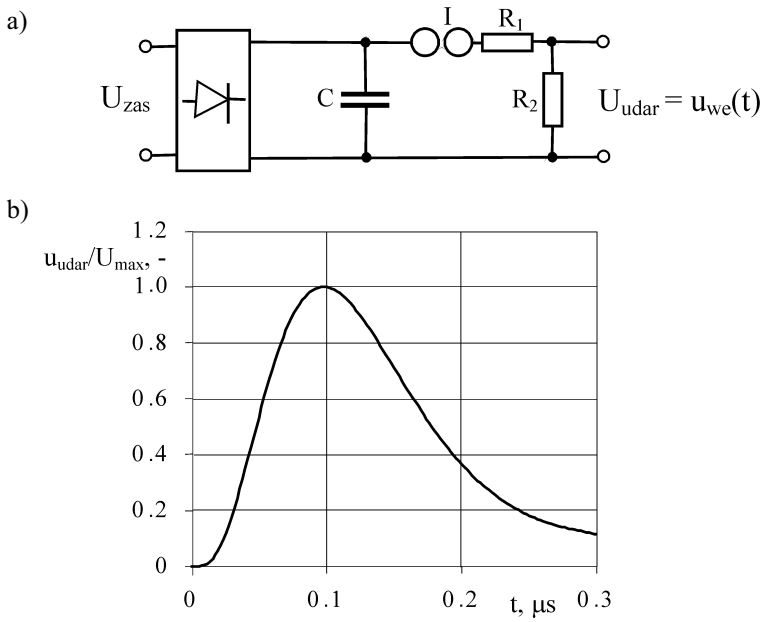
Charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia transformatorów wyznaczono przy wykorzystaniu szybkiej transformaty Fouriera zaimplementowanej w środowisku Matlab.



Rys. 3. Uproszczone przekroje uzwojeń górnego napięcia transformatorów doświadczalnych 15/0,4 kV: a) uzwojenie górnego napięcia transformatora 250 kVA; b) uzwojenie górnego napięcia transformatora 20 kVA

Tabela 1. Parametry techniczne uzwojeń górnego napięcia transformatora 250 kVA, 15/0,4 kV oraz transformatora 20 kVA, 15/0,4 (rys. 3)

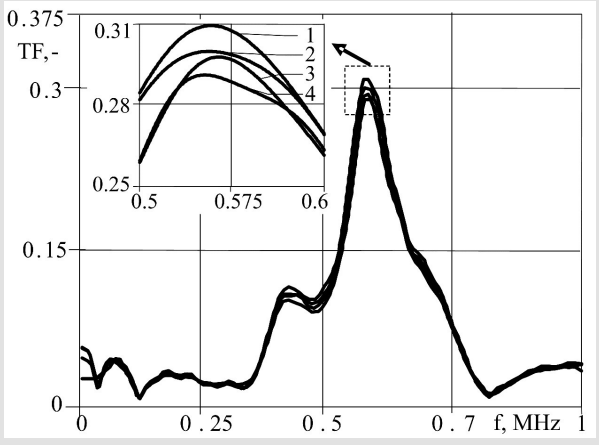
Moc znamionowa, kVA	250	20	
Napięcie znamionowe, kVA	15/0,4 kV	15/0,4 kV	
Typ uzwojenia / cewki	warstwy	cewki zwykle	cewki wzmocnione
Wysokość uzwojenia, H, mm	732	840	840
Liczba cewek / warstw, –	14	4	4
Średnica wewnętrzna d_i, m	0,201/0,233	0,157	0,157
Średnica zewnętrzna d_0, m	0,255/0,303	0,205	0,205
Liczba zwojów w cewce / warstwie, –	191	810	650
Odległość między cewkami/warstwami g, mm	0,3	30	30
Wysokość cewki / warstwy h_c, mm	366	280	280



Rys. 4. Wytwarzanie krótkotrwałych udarów napięciowych: a) uproszczony schemat generatorów udarów napięciowych: C = 10 nF, R_1 = 0,1 Ω, R_2 = 5 Ω; b) przebieg udaru napięciowego o czasach 50/180 ns

4. WYNIKI BADAŃ USZKODZEŃ UZWOJEŃ TRANSFORMATORÓW

Badania transformatorów obejmowało wyznaczanie funkcji przenoszenia po uszkodzeniach mających postać przemieszczeń uzwojeń oraz zwarć wewnętrznych. Celem badań było wyznaczenie zależności między uszkodzeniami a zmianami charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia $TF = g(f)$ wyznaczonych metodą impulsową. Doświadczalne zależności $TF = g(f)$ transformatora 250 kVA po przemieszczeniu promieniowym uzwojenia względem kolumny rdzenia przedstawiono na rysunku 5.

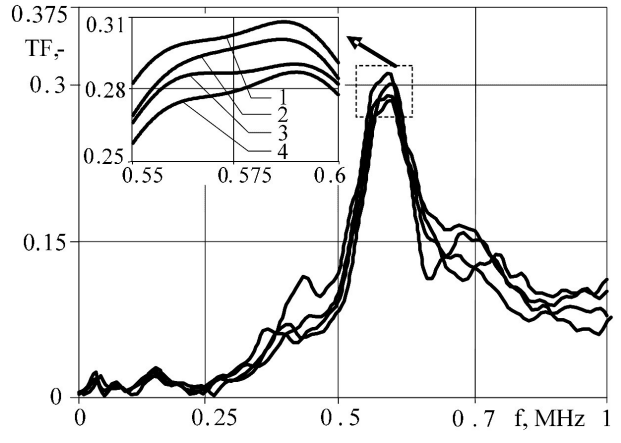


Rys. 5. Zależności $TF = g(f)$ uzwojenia transformatora 250 kVA po przemieszczeniu promieniowym uzwojenia względem kolumny rdzenia: 1 – uzwojenie przed przesunięciem; 2, 3, 4 – kolejne etapy przemieszczania promieniowego uzwojenia względem rdzenia

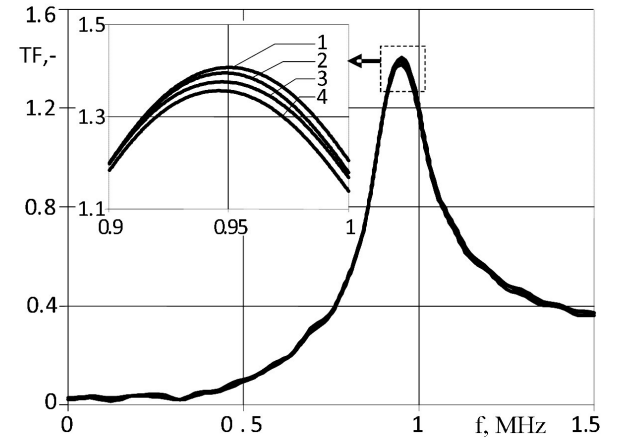
Krzywe $TF = g(f)$, wyznaczone metodą impulsową (rys. 5), wyróżniają się odmiennym kształtem dla różnych położeń uzwojenia względem rdzenia. Największe zmiany funkcji przenoszenia transformatora, spowodowane przemieszczeniami uzwojenia, występują przy częstotliwości 570 kHz, przy której funkcja przenoszenia osiąga wartości maksymalne. Przy zmniejszaniu odległości między uzwojeniem a kolumną rdzenia następuje zmniejszenie wartości maksymalnych funkcji przenoszenia. Podczas badań wykonywano także pomiary pojemności między uzwojeniem a rdzeniem. Całkowita pojemność doziemna uzwojenia przed jego przemieszczaniem wynosiła 0,15 nF. Zbliżanie uzwojenia do kolumny rdzenia powoduje zwiększenie pojemności. Przesunięcie promieniowe uzwojenia o około 1,5 mm powodowało zwiększenie pojemności o około 6 pF. Maksymalna względna zmiana pojemności doziemnej uzwojenia spowodowana przemieszczeniem uzwojenia względem kolumny podczas badań wynosiła 8%.

Podczas badań zwierano również kolejno części regulacyjne uzwojenia transformatora 250 kVA włączone pomiędzy zaciskami przełącznika zaczepów i wyznaczano funkcje przenoszenia. Całkowita liczba zwojów części regulacyjnej uzwojenia stanowi 10% ogólnej liczby zwojów uzwojenia. Wyniki badań zależności $TF = g(f)$ przed uszkodzeniem i po zwarciu kolejnych sekcji regulacyjnych uzwojenia górnego napięcia przedstawiono na rysunku 6.

Badania transformatora 20 kVA obejmowały zwarcia wybranych cewek uzwojenia górnego napięcia. W kolejnych etapach badań zwiększano liczbę zwojów zwartych, a największa liczba zwojów zwartych obejmowała 30% ogólnej liczby zwojów uzwojenia (rys. 7).



Rys. 6. Zależności $TF = g(f)$ uzwojenia transformatora 250 kVA po zwarciu fragmentów uzwojenia górnego napięcia pomiędzy kolejnymi zaciskami przełącznika zaczepów: 1 – bez zwarcia, 2, 3, 4 – zwarcie kolejno dwu, trzech i czterech zacisków przełącznika zaczepów



Rys. 7. Zależności $TF = g(f)$ uzwojenia transformatora 20 kVA po zwarciu wybranych cewek: 1 – bez zwarcia, 2, 3, 4 – zwarcie kolejno jednej, dwu i trzech cewek

Z porównania zależności częstotliwościowych funkcji przenoszenia transformatorów, wyznaczonych po zwarciach kolejnych cewek uzwojenia transformatora 20 kVA, wynika, że zwarcia wewnętrzne w uzwojeniach mają duży wpływ kształty tych zależności (rys. 6, 7). Największe zmiany funkcji przenoszenia, spowodowane zwarciami pomiędzy zwojami transformatora 250 kVA ujawniają się przy częstotliwości 570 kHz, a w przypadku transformatora 20 kVA dla częstotliwości 900 kHz. Charakter zmian charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia, spowodowanych zwarciami wewnętrznymi dla obu transformatorów jest taki sam. Zwarcie fragmentów uzwojeń znajduje swoje odzwierciedlenie w postaci zmian wartości maksymalnych funkcji przenoszenia. W miarę zwiększania liczby zwartych zwojów wartości maksymalne funkcji przenoszenia ulegają zmniejszeniu. Zwarcia wewnętrzne w uzwojeniu nie powodują jednak zmian częstotliwości, przy której funkcje przenoszenia osiągają wartości maksymalne.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdzają, że charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia, wyznaczane metodą impulsową, mogą stanowić podstawę wykrywania uszkodzeń uzwojeń o zróżnicowanych parametrach konstrukcyjnych. Niewielkie przemieszczenia uzwojeń względem rdzenia lub zwarcia wewnętrzne znajdują bowiem swoje odzwierciedlenie w zmianach kształtów zależności częstotliwościowych funkcji przenoszenia wyznaczonych tą metodą. Największe zmiany występują w tych zakresach częstotliwości, w których funkcje przenoszenia osiągają wartości maksymalne. Przemieszczanie promieniowe uzwojenia oraz zwarcia wewnętrzne powodują zmniejszanie wartości maksymalnych funkcji przenoszenia. Zastosowanie metody impulsowej do wyznaczania zależności częstotliwościowych funkcji przenoszenia umożliwia badania uszkodzeń podczas pracy transformatorów bez konieczności ich wyłączania.

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., No. 18, 2003, s. 493–505.

[2] Florkowski M., Furgał J.: *Detection of Transformer Windings Deformations Based on the Transfer Function – Measurements and Simulations*. Meas. Scien. and Techn., No. 14, 2003, s. 1986–1992.

[3] Christian J., Feser K.: *Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method.* IEEE Trans. on Pow. Deliv., No. 19, 2004, s. 214–220.

[4] Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D.: *Improved Detection of Power Transfomer Winding Movement by Extending the FRA High Frequency Range.* IEEE Trans. on Pow. Deliv., No. 20, 2005, s. 1930–1938.

[5] Florkowski M., Furgał J.: *High Frequency Method for Determining Winding Faults in Transformers and Electrical Machines.* Rev. of Scien. Instr., American Inst. of Phys. (USA), 76, 114701, 2005 (6 s.).

[6] Malewski R., Poulin B.: *Impulse Testing of Power Transformers using the Transfer Function Method.* IEEE Trans. on Pow. Deliv., No. 2, 1988, s. 476–489.

[7] Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D.: *Condition Monitoring of Transformers in Service by the Low Voltage Impulse Test Method*. Eleventh Int. Symp. on High-Volt. Eng., London, Aug. 23–27, vol. I., 1999, paper 1.45.S3.

[8] Florkowski M., Furgał J.: *Rozpoznawanie uszkodzeń uzwojeń na podstawie funkcji przenoszenia transformatorów*. Przegl. Elektrot., ISSN 0033-2097, r. 83, nr 12/2007, s. 60–63.

[9] Nirgude P.M., Gunasekharan B., Rajkumar A.D., Singh B.P., Suma M.: *Investigations on Detection of Winding Movements in Transformers by Frequency Response Analysis*. 14th Int. Symp. on High Voltage Engin. ISH'2005 (Beijng, China), paper G-065, 2005.

[10] El-Hajjar H., Wang Z.D., Sofian Z.D., Jarman P.N., Ryder S.A., Darwin A.W.: *Analysis and Inretpretation of FRA Measurement Results using Transfer Function Application on Large Power Transformers*. 14th Int. Symp. on High Voltage Engin. ISH'2005 (Beijng, China), paper G-098, 2005.

Wpłynęło: 14.06.2010

Jakub FURGAŁ

Jakub Furgał, absolwent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej. Stopnie naukowe magistra, doktora i doktora habilitowanego uzyskał odpowiednio w latach 1980, 1988 i 2005. Pracuje w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH. Jego zainteresowania naukowe obejmują problemy dotyczące przepięć w układach elektroenergetycznych, problemy ochrony przepięciowej i zagadnienia diagnostyczne transformatorów energetycznych.

e-mail: furgal@agh.edu.pl

Maciej KUNIEWSKI

Maciej Kuniewski, student studiów doktoranckich Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej na kierunku elektrotechnika.

Interesuje się metodami badań diagnostycznych transformatorów energetycznych.

e-mail: m.kuniewski@gmail.com