



Badania eksperymentalne i teoretyczne funkcji przenoszenia zniekształcanego uzwojenia transformatora

Streszczenie: Do wykrywania zniekształceń uzwojeń transformatorów jest proponowana obecnie metoda funkcji przenoszenia. Głównym problemem w jej stosowaniu jest interpretacja wyników pomiarów. W artykule przedstawiono wyniki rejestracji oraz symulacji numerycznych funkcji przenoszenia zniekształcanego uzwojenia warstwowego. Analizowano wpływ charakteru oraz zakresu zniekształcenia uzwojenia na zmiany przebiegów funkcji.

Abstract: (*Experimental and theoretical investigations of the transfer function of a deformed transformer winding*). The transfer function method is proposed to detection of deformations of transformer windings at present. However, the interpretation of the measurement results is the main problem in usage of the method. The measurement results and numerical simulations of the transfer functions of the deformed layer winding are presented in the paper. An influence of a character and range of the winding deformation on changes of transfer function waveform are analysed.

Słowa kluczowe: badania transformatorów, funkcja przenoszenia, wykrywanie zniekształceń uzwojeń, modelowanie uzwojeń.

Keywords: investigations of transformers, transfer function, detection of winding deformations, modelling of windings.

Wprowadzenie

Uzwojenia transformatorów energetycznych są często narażone na oddziaływanie sił elektromagnetycznych towarzyszących przepływowi prądów zwarciovych. Również podczas transportu narażenie uzwojeń transformatorów stanowią siły mechaniczne. Skutkiem oddziaływania sił mogą być przemieszczenia lub zniekształcenia uzwojeń. Mogą one być przyczyną uszkodzeń samych uzwojeń oraz izolacji elektrycznej. Na uszkodzenia są podatne szczególnie układy izolacyjne transformatorów po długim czasie eksploatacji. Wytrzymałość mechaniczna izolacji papierowej takich transformatorów jest znacznie zmniejszona skutek długotrwałych procesów starzeniowych.

Do wykrywania zniekształceń uzwojeń lub przesunięć zwojów od wielu lat jest stosowana metoda badań w oparciu o pomiar indukcyjności rozproszenia, wykonywany przy częstotliwości sieciowej. Stan techniczny uzwojeń jest sprawdzany także podczas inspekcji wewnętrznych. Wiąże się to jednak z koniecznością prowadzenia uciążliwych i kosztownych prac demontażowych. Z tego względu są rozwijane inne metody, umożliwiające wykrywanie zniekształceń uzwojeń. Szczególnie intensywnie jest doskonalona i stosowana coraz częściej w diagnostyce transformatorów metoda funkcji przenoszenia uzwojeń [1,2,3]. Badania zniekształceń uzwojeń mają charakter porównawczy. Funkcje przenoszenia są porównywane z przebiegami zarejestrowanymi wcześniej. Odmienne kształty funkcji świadczą o zniekształceniu uzwojenia. Podstawowe znaczenie praktyczne, umożliwiające identyfikację uszkodzeń, ma znajomość zależności między formą i zakresem zniekształceń uzwojeń, a zmianami kształtów funkcji [4,5].

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów funkcji przenoszenia uzwojenia warstwowego transformatora poddawanego wybranym zniekształceniom. Zamieszczono również wyniki symulacji numerycznych funkcji. Analizowano wpływ wybranych zniekształceń uzwojenia na zmiany przebiegów funkcji przenoszenia.

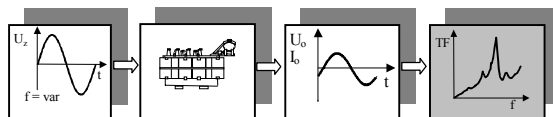
Metoda pomiaru funkcji przenoszenia transformatorów

Funkcje przenoszenia transformatorów (TF) są definiowane jako zależności częstotliwościowe stosunków odpowiednich prądów lub napięć na zaciskach transformatora do napięcia zasilania. 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 przejawia się zmianą wewnętrznych pojemności, indukcyjności i rezystancji, a w konsekwencji przestrojeniem charakterystycznych częstotliwości rezonansowych admitancji.

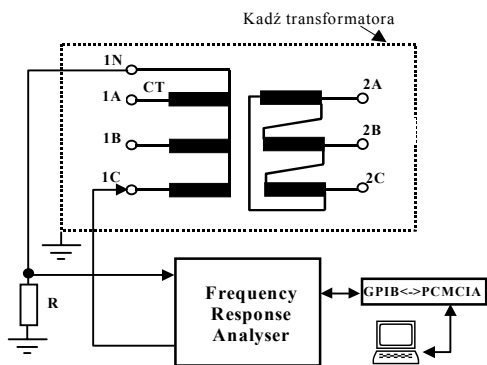
Funkcja przenoszenia może być wyznaczana dwiema metodami. W pierwszej wartości funkcji są obliczane po zarejestrowaniu przebiegów prądu lub napięcia w transformatorze przy wymuszeniu napięciem impulsowym. Metoda wymaga rozłożenia przebiegu wymuszającego oraz odpowiedzi na składowe harmoniczne. Stosowany jest w tym celu zwykle algorytm szybkiej transformaty Fouriera (FFT) [6]. Przy zastosowaniu tej metody możliwe jest prowadzenie badań on-line podczas pracy transformatora w oparciu o zarejestrowane odpowiedzi na udary piorunowe lub łączeniowe. W celu zminimalizowania szumu kwantyzacji rejestrację w tej metodzie są wykonywane z zastosowaniem co najmniej 10-bitowego przetwarzania analogowo-cyfrowego [2].

Druga metoda, zastosowana w prezentowanych badaniach, opiera się na wyznaczeniu funkcji przenoszenia dla dyskretnych wartości częstotliwości na podstawie pomiarów napięć lub prądów płynących przy wymuszeniu napięciem sinusoidalnym o częstotliwości zmieniającej się z zadaniem krokiem w określonym paśmie (rys.1).



Rys. 1. Schemat blokowy metody wyznaczenia funkcji przenoszenia transformatorów przy zastosowaniu wymuszenia sinusoidalnego

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2. W pomiarach stosowano niskonapięciowe wymuszenie o amplitudzie 10 V, przestrajane w zakresie częstotliwości od 0,1 kHz do 5 MHz dla 300 punktów pomiarowych. Prąd w uzwojeniu transformatora mierzono za pomocą posobnika R połączonego szeregowo z uzwojeniem.

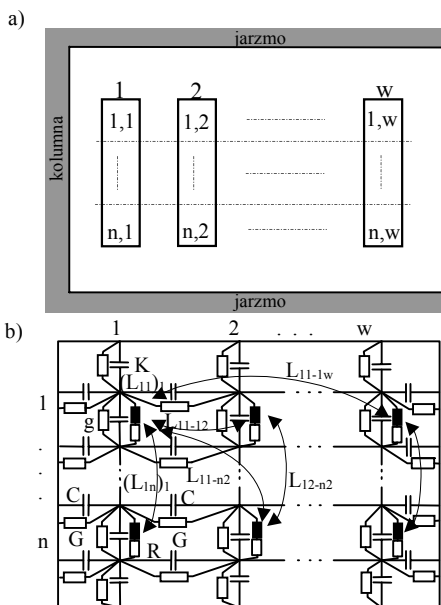


Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

Do pomiarów funkcji przenoszenia wykorzystano analizator FRA (Frequency Response Analyser) połączony z komputerem nadzorczym za pomocą interfejsu GPIB-PCMCIA [7]. Dedykowane oprogramowanie do pomiarów funkcji przenoszenia zostało zaimplementowane w pakiecie LabView firmy National Instruments.

Metoda obliczeń funkcji przenoszenia uzwojeń transformatorów

Obliczenia funkcji przenoszenia uzwojeń, którą stanowi admitancja uzwojenia, prowadzono przy wykorzystaniu schematu zastępczego uzwojeń przedstawionego na rysunku 3. Reprezentuje on w uzwojeń jednej fazy transformatora, z których każde jest podzielone na n sekcji.



Rys. 3. Model transformatora: a) podział uzwojeń (1, 2 ... w) na sekcje (1, 2 ... n), b) schemat uzwojeń [8,9]

Zależności między napięciami doziemnymi w węzłach a prądami w gałęziach indukcyjno-rezystancyjnych schematu wyraża następujący układ równań:

$$(1) \quad C \frac{dU(t)}{dt} + G U(t) + T_L^t I(t) = -C_u \frac{du_z(t)}{dt} - G_u u_z(t)$$

$$(2) \quad L \frac{dI(t)}{dt} - T_L(t) U(t) + R I(t) = T_{Lu} u_z(t)$$

gdzie: U, I - wektory napięć doziemnych w węzłach i prądów w gałęziach indukcyjno-rezystancyjnych,
 C, G - macierz pojemności między uzwojeniem a rdzeniem, pomiędzy uzwojeniami i pojemności

wzdłużnych uzwojeń oraz macierz konduktancji izolacji,
 R, L - macierze odpowiednio rezystancji oraz indukcyjności sekcji uzwojeń,
 C_u, G_u - wektory, utworzone z macierzy C oraz G , zawierające odpowiednio pojemności i konduktancje między węzłem, do którego przyłożono napięcie zewnętrzne $u_z(t)$ a węzłami sąsiednimi,
 T_L - macierz łącząca, o strukturze zależnej od układu połączeń uzwojeń, zawierająca wyrazy o wartościach 1 oraz -1,
 T_{Lu} - macierz, którą stanowi kolumna macierzy T_L o numerze zgodnym z numerem węzła, do którego przyłożono napięcie $u_z(t)$ [8,9].

Elementy macierzy pojemności C reprezentują pojemności między sekcjami uzwojeń a rdzeniem, pojemności między sekcjami w sąsiednich uzwojeniach oraz pojemności wzdłużne uzwojeń. Ich wartości można wyznaczyć w wyniku pomiarów lub obliczeń [10]. Elementy macierzy G stanowią wartości konduktancji izolacji między uzwojeniem a rdzeniem oraz między sąsiednimi uzwojeniami [11]. Rezystancje oraz indukcyjności uzwojeń są funkcjami częstotliwości [12,13]. Przyjmuje się, że dla częstotliwości większych od 10 kHz indukcyjności uzwojeń z rdzeniem są praktycznie równe wartościom indukcyjności cewek powietrznych [13].

Gdy przebieg napięcia wymuszającego $u_z(t)$ jest sinusoidalny to układ równań (1), (2) można przekształcić do następującej postaci [9,14]:

$$(3) \quad U = (Y + T_L^t Z^{-1} T_L)^{-1} (T_L^t Z^{-1} T_{Lu} U_z + Y_u U_z)$$

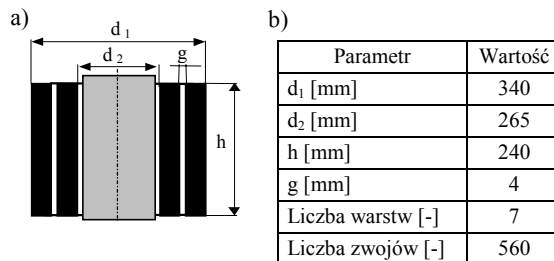
$$(4) \quad I = Z^{-1} (T_L U + T_{Lu} U_z)$$

gdzie: Y, Y_u, Z - macierze odpowiednio admitancji i impedancji układu wyrażone wzorami: $Y = j\omega C + G$;
 $Y_u = j\omega C_u + G_u$; $Z = j\omega L + R$

Równania (3) i (4) wyrażają wektory U napięć doziemnych w węzłach oraz prądów I w gałęziach indukcyjno-rezystancyjnych schematu.

Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń funkcji przenoszenia zniekształcanego uzwojenia

Wykonano badania wpływu wybranych zniekształceń uzwojenia transformatora na przebiegi jego funkcji przenoszenia. Funkcje przenoszenia były reprezentowane przez jego admitancję uzwojenia.

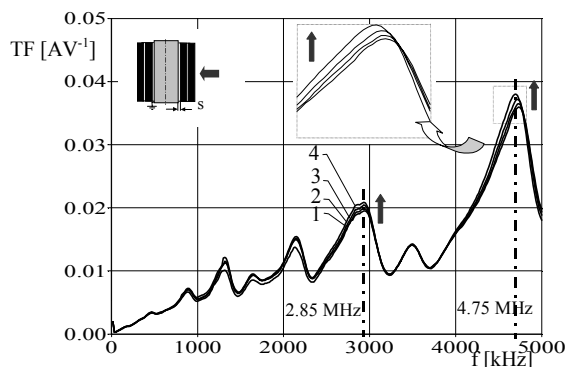


Rys. 4. Budowa doświadczalnego uzwojenia transformatora średniego napięcia: a) uproszczony przekrój, b) podstawowe parametry uzwojenia

Obiektem doświadczalnym było uzwojenie warstwowe górnego napięcia transformatora rozdzielczego 15/0,4kV o mocy 0,16 MVA (rys. 4). Podczas badań uzwojenie przemieszczano wzdłuż promienia kolumny rdzenia, wzdłuż jej osi oraz poddawano zniekształceniom w wyniku

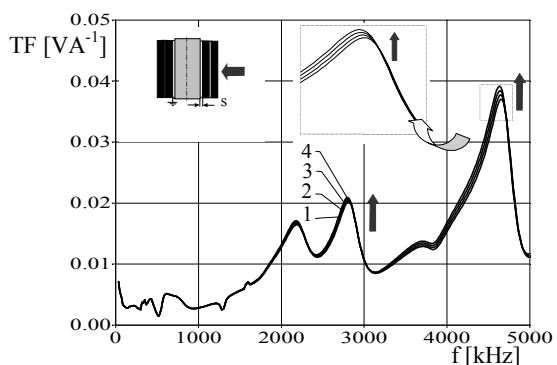
oddziaływania sił ściskających skierowanych prostopadle do ścian bocznych z przeciwległych stron.

Wykresy funkcji przenoszenia, rejestrowane podczas przemieszczania uzwojenia wzdłuż promienia rdzenia, zamieszczono na rysunku 5. Z krzywych wynika, że ze zmniejszaniem odległości s między uzwojeniem a rdzeniem maleją wartości maksymalne lokalnych ekstremów funkcji, występujące przy częstotliwościach 2,85 MHz oraz 4,75 MHz. Z analizy wykresów widać także, że w oparciu o wykonane pomiary możliwe jest wykrycie przemieszczenia uzwojenia wzdłuż promienia rdzenia o odległość s równą około 0,2 cm (tj. o około 0,75% średnicy wewnętrznej uzwojenia).



Rys. 5. Doświadczalne funkcje przenoszenia uzwojenia przemieszczanego wzdłuż promienia rdzenia: 1- $s=0$ cm (przed zniekształceniem), 2- $s=0,2$ cm, 3- $s=0,4$ cm, 4- $s=0,6$ cm

Wykonano również symulacje numeryczne funkcji przenoszenia uzwojenia doświadczalnego. Każdą warstwę podzielono na osiem sekcji ($n=8$ – rys. 3a) i modelowano, tak jak gdyby stanowiła ona oddzielne uzwojenie ($w=7$). Obliczenia wykonano w środowisku Matlab 6.1. Ich celem jest zbadanie możliwości wyznaczania metodą teoretyczną związków między zmianami parametrów elektrycznych uzwojenia, uwzględnianych w prezentowanym modelu, spowodowanymi zniekształceniami uzwojenia, a zmianami przebiegów funkcji przenoszenia. Znajomość tych zależności jest niezbędna przy identyfikacji zniekształceń uzwojeń transformatorów badanych metodą funkcji przenoszenia.

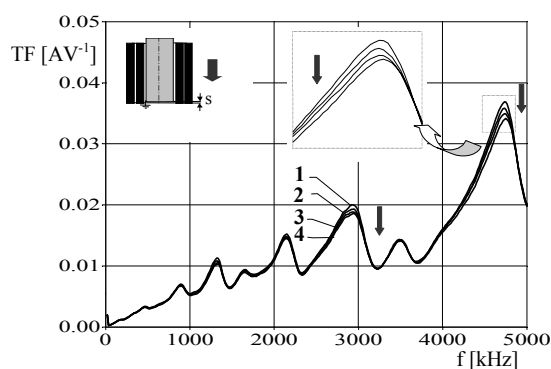


Rys. 6. Teoretyczne funkcje przenoszenia uzwojenia przemieszczanego wzdłuż promienia rdzenia: a-1- $s=0,6$ cm (przed zniekształceniem), 2- $s=0,4$ cm, 3- $s=0,2$ cm, 4- $s=0$ cm

Na podstawie pomiarów, wykonywanych jednocześnie z rejestracjami funkcji przenoszenia, stwierdzono, że z tymi przemieszczeniami są związane zmiany wartości pojemności pomiędzy uzwojeniem a rdzeniem. Gdy odległość s maleje o 0,2 cm to pojemności wzrastają o około 5,5 pF (z 352 pF do 357,5 pF). Zmiany te uwzględniono w obliczeniach funkcji przenoszenia uzwojenia. Z wyników symulacji przedstawionych na rys.6 widać, że zmiany w modelu

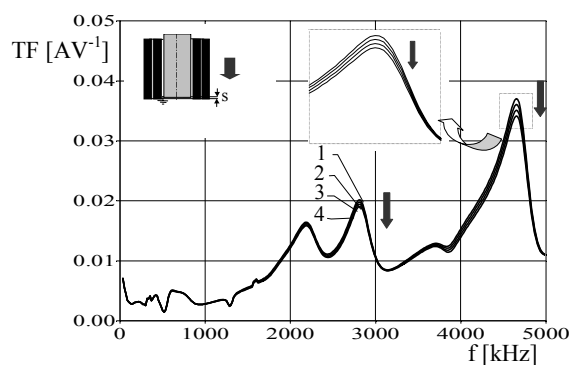
cyfrowym wartości pojemności reprezentującej pojemności między przemieszczanym uzwojeniem doświadczalnym, a rdzeniem prowadzą do takich samych zmian kształtów teoretycznych funkcji przenoszenia, jakie charakteryzują funkcje doświadczalne (rys.5).

Funkcje przenoszenia, zarejestrowane po każdorazowym przemieszczeniu uzwojenia wzdłuż osi rdzenia, zamieszczono na rysunku 7. Krzywe wyznaczono w czterech wybranych położeniach uzwojenia, gdy wartości s były zawarte w zakresie od 0cm do 3cm. Widoczne są lokalne zmiany przebiegów krzywych szczególnie w tych przedziałach częstotliwości, gdzie funkcja osiąga wartości maksymalne. Przy zwiększaniu odstępów s następuje zmniejszenie tych wartości.



Rys. 7. Doświadczalne funkcje przenoszenia uzwojenia przemieszczanego wzdłuż osi kolumny: 1- $s=0$ cm (przed zniekształceniem), 2- $s=1$ cm, 3- $s=2$ cm, 4- $s=3$ cm

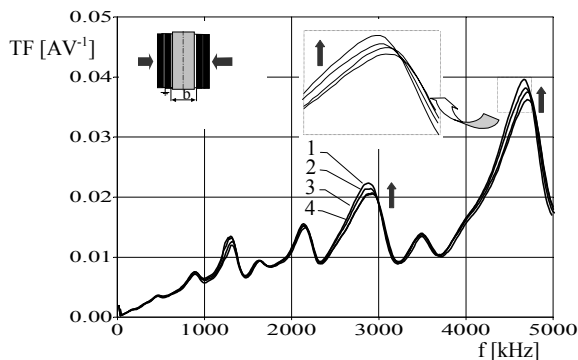
Z pomiarów wynika, że po przemieszczeniu uzwojenia wzdłuż kolumny rdzenia o 3cm ($s=0$ cm, 1cm, 2cm, 3cm) (Rys.7) wartości pojemności pomiędzy uzwojeniem a rdzeniem zmalały o 10,5pF (z 352pF do 341,5pF). Wyniki symulacji numerycznych funkcji przenoszenia uzwojenia przemieszczanego wzdłuż kolumny rdzenia (rys. 8). prowadzonych z uwzględnieniem zmian tych pojemności przedstawiono na rysunku 8. Zmiany kształtów krzywych modelowanych są zbliżone do zmian funkcji rejestrowanych (rys.7).



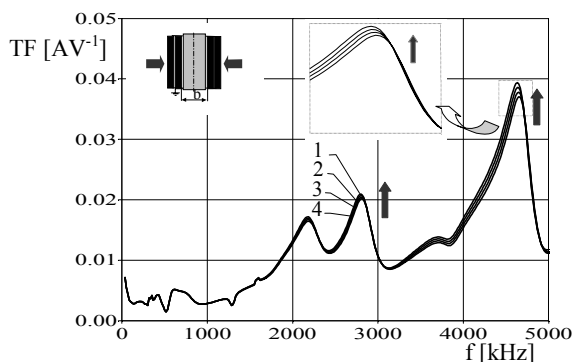
Rys. 8. Teoretyczne funkcje przenoszenia uzwojenia przemieszczanego wzdłuż kolumny rdzenia: 1- $s=0$ cm (przed zniekształceniem), 2 - $s=1$ cm, 3 - $s=2$ cm, 4 - $s=3$ cm

Doświadczalne funkcje przenoszenia uzwojenia zniekształcanego na skutek oddziaływania sił ściskających, prostopadłych do ścian bocznych uzwojenia zamieszczono na rysunku 9. Widoczne zmiany ich przebiegów wynikają również głównie ze wzrostu wartości pojemności między zniekształcanym uzwojeniem a rdzeniem. Gdy średnica uzwojenia zniekształcanego ulega zmniejszeniu od 26,5 cm do 26,2 cm to pojemność między uzwojeniem a rdzeniem wzrasta o 13 pF (od 352pF do 365pF). Zniekształcenie uzwojenia doświadczalnego nie wpłynęło praktycznie na zmianę wartości

indukcyjności własnych i wzajemnych między sekcjami ze względu na niewielkie zmiany wymiarów uzwojenia.



Rys. 9. Doświadczalne funkcje przenoszenia uzwojenia ściskanego: a- $b_2=26,5\text{cm}$ (przed deformacją), 2- $b_2=26,2\text{cm}$, 3- $b_2=25,9\text{cm}$, 4- $b_2=25,6\text{cm}$



Rys. 10. Teoretyczne funkcje przenoszenia uzwojenia poddawanego oddziaływaniu sił ściskających: 1- $b_2=26,5\text{cm}$ (przed deformacją), 2- $b_2=26,2\text{cm}$, 3- $b_2=25,9\text{cm}$, 4- $b_2=25,6\text{cm}$

Z porównania wyników symulacji numerycznych funkcji (rys.10) z wynikami rejestracji (rys.9) widać, że uwzględnienie w modelu cyfrowym zmian pojemności, spowodowanych zniekształceniami prowadzi do zmian teoretycznych funkcji zbliżonych do zaobserwowanych na przebiegach doświadczalnych. O badań wynika także, że charakter zmian funkcji przenoszenia uzwojenia ściskanego i przemieszczanego w kierunku kolumny rdzenia jest taki sam (rys.7, rys.9). Podobny jest bowiem wpływ przemieszczania wzdłuż promienia rdzenia oraz deformowania badanego uzwojenia pod wpływem oddziaływania sił ściskających na zmianę jego parametrów.

Podsumowanie

Z badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych funkcji przenoszenia uzwojenia warstwowego transformatora wynika, że zniekształcenia oraz przemieszczenia uzwojenia znajdują swoje odzwierciedlenie w zmianach przebiegów funkcji. Zniekształcenie uzwojenia, wynikające z działania sił ściskających oraz przemieszczenie w kierunku kolumny rdzenia powoduje zwiększenie lokalnych wartości maksymalnych funkcji. Przemieszczenie uzwojenia wzdłuż kolumny ujawnia się natomiast zmniejszeniem tych wartości. Zmiany kształtów funkcji przenoszenia badanego uzwojenia wynikają głównie ze zmiany pojemności pomiędzy uzwojeniem a rdzeniem będącej konsekwencją zniekształceń.

Charakter i zakres zmian kształtów funkcji przenoszenia zniekształcanego uzwojenia uzyskanych w wyniku symulacji numerycznych jest zgodny ze zmianami funkcji eksperymentalnych. Potwierdza to możliwość wykorzystywania przedstawionego modelu numerycznego uzwojeń do prowadzenia symulacji komputerowych funkcji przenoszenia w celu doskonalenia procedury wykrywania i rozpoznawania uszkodzeń uzwojeń transformatorów badanych metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej.

LITERATURA

- [1] Malewski R., Douville J., Belanger G., Insulation Diagnostic System for HV Power Transformer Insulation. *CIGRE Paris*, ref. 12 - 01, 1986
- [2] Malewski R., Poulin B., Impulse Testing of Power Transformers Using the Transfer Function Method, *IEEE Trans. on PD*, Vol. 3, No 2, 1988, pp. 476 – 489
- [3] Malewski R., Szrot M., Płowucha J., Lokalizacja odkształcenia uzwojeń transformatora wspomaganą modelem komputerowym. *Konferencja Naukowo-Techniczna: Transformatory w Eksploatacji*, Sieniawa, 23-25 kwietnia 2003, str. 47-59
- [4] Leibfried T., Feser K.: Monitoring of Power Transformers Using the Transfer Function Method, *IEEE Trans. on PD*, Vol. 14, No. 4, October 1999, pp. 1333- 1341
- [5] Rahimpour E., Christian J., Feser K., Mohseni H., Calculation of the Transfer Function to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings. *12th Int. Symp. on High Voltage Engineering ISH'2001*, Bangalore (India), 20-24 August 2001
- [6] Wang M., Vandermaar A. J., Srivastava K. D., Condition Monitoring of Transformers in Service by the Low Voltage Impulse Test Method. *11th Int. Symp. on High Voltage Engineering ISH'1999*, London, 23-27 August 1999, Vol. I.
- [7] Florkowski M.: Transfer Function Based Diagnostics of Transformers - FRA User Guide, *ABB Corporate Research - Internal Report*, 1999
- [8] Degeneff R. C., A General Method for Determining Resonances in Transformer Winding, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS - 96, No. 2, March/April 1977, pp. 423 - 430
- [9] Florkowski M., Furgał J., Experimental and Theoretical Determination of Transfer Function of Transformer Windings. *Archives of Electrical Engineering*, Warsaw, Vol. LII, No 2, 2003, pp. 137-152
- [10] Massarini A., Kazimierczuk M.K., Grandi G., Lumped Parameter Models for Single- and Multiple-Layer Inductors, *Proc. Power Electron Specialist Conf. Baveno*, June 1996, pp. 295 - 3001
- [11] Mombello E.E., Ratta G., Rivera J. F., Study of Internal Stresses in Transformer Windings Due to Lightning Transient Phenomena. *Electric Power System Research*, No. 21, 1991, pp. 161 - 172
- [12] de Leon F., Semlyen A., Detailed Modelling of Eddy Current Effects for Transformer Transients. *IEEE Trans. on PD*, Vol. 9, No 2, April, 1994, pp.1143 - 1150
- [13] Wilcox D. J., Hurley W. G., Conlon M., Calculation of Self and Mutual Impedances Between Sections of Transformer Windings, *IEE Proc.*, Vol. 136, Pt. C, No. 5, September 1989, pp. 308 – 314
- [14] Rahimpour E., Christian J., Feser K., Mohseni H.: Modellierung der Transformatorwicklung zur Berechnung der Übertragungsfunktion für die Diagnose von Transformatoren. *Elektrie*, Berlin, 54, 2000, s.18 - 31

Autorzy: dr inż. Marek Florkowski, ABB Corporate Research, 31 - 038 Kraków, ul. Starowiślna 13A, e-mail: marek.florkowski@pl.abb.com
dr inż. Jakub Furgał, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, 30 - 059 Kraków, al. Mickiewicza 30, e-mail: furgal@uci.agh.edu.pl