



Marek FLORKOWSKI¹, Jakub FURGAŁ²

Centrum Badawcze ABB (1), Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki (2)

Ocena uszkodzeń uzwojeń na podstawie odpowiedzi częstotliwościowych

Streszczenie. Badania diagnostyczne uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych są systematycznie rozszerzane. Stan techniczny uzwojeń wpływa bowiem w zasadniczy sposób na niezawodność pracy tych urządzeń. Do wykrywania uszkodzeń uzwojeń jest stosowana coraz szerzej metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej, a jednocześnie doskonalone są kryteria oceny stanu technicznego uzwojeń. W artykule przedstawiono analizę możliwości identyfikacji uszkodzeń uzwojeń o różnicowanych konstrukcjach i parametrach na podstawie odpowiedzi częstotliwościowych.

Abstract. (Assessment of winding failures on base of frequency responses). Diagnostics investigations of transformer and electric machine windings are expanded systematically. Technical state of windings has basic influence on responsibility of work these devices. The method frequency response analysis is more and more frequently used to detection of winding failures, but at the same time the criterion of assessment of winding technical state are systematically developed. Analysis of possibility of identification of winding failures with different construction and parameters on base of the frequency responses is presented in the paper

Słowa kluczowe: uszkodzenia uzwojeń, badania diagnostyczne, analiza odpowiedzi częstotliwościowej, funkcja przenoszenia.

Keywords: failures of windings, diagnostic investigations, frequency response analysis, transfer function.

Wprowadzenie

Wczesne wykrywanie uszkodzeń uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia niezawodności pracy tych urządzeń. Transformatory są poddawane oddziaływaniom różnorodnych narażeń mogących prowadzić do uszkodzeń uzwojeń. Wpływ na stan techniczny transformatorów mają siły mechaniczne powodujące zniekształcenia lub przemieszczenia uzwojeń. Uszkodzenia takie powstają głównie podczas przepływu prądów zwarciovych generujących znaczne siły elektrodynamiczne, a także w czasie transportu transformatorów na skutek oddziaływania sił mechanicznych. W warunkach eksploatacji maszyn elektrycznych uzwojenia mogą ulegać uszkodzeniom podczas zwarć wewnętrznych. Są one skutkiem uszkodzeń fragmentów układów izolacyjnych zwojów będących konsekwencją zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej materiałów izolacyjnych na skutek procesów starzeniowych oraz oddziaływania lokalnych naprężeń mechanicznych. Lokalne uszkodzenia uzwojeń mogą prowadzić do przegrzania maszyny lub zmiany jej parametrów elektrycznych. Konsekwencją zwarć pomiędzy zwojami jest zmiana wartości rezystancji i indukcyjności uzwojeń. Zmiany te są niekiedy niewielkie i nie możliwe do wykrycia metodą pomiarową. Również sprawdzanie stanu technicznego uzwojeń transformatorów przez prowadzenie inspekcji wewnętrznych wiąże się natomiast zwykle z uciążliwymi i kosztownymi pracami demontażowymi.

Do wykrywania uszkodzeń uzwojeń urządzeń elektrycznych jest proponowana obecnie metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej FRA (ang. *Frequency Response Analysis*). Opiera się ona na zależnościach między przebiegami admitancji uzwojeń lub funkcji przenoszenia, a budową uzwojeń. Znajduje ona zastosowanie do wykrywania uszkodzeń uzwojeń transformatorów [1]. Prowadzone są badania mające na celu szersze stosowanie do maszyn elektrycznych [2,3]. Jednocześnie jednak wymaga ona doskonalenia kryteriów oceny stanu technicznego badanych uzwojeń.

W artykule przedstawiono badania uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej. Uzwojenia poddawano uszkodzeniom doświadczalnym o różnorodnym charakterze. Uzwojenie jednej fazy transformatora przemiesz-

czano wzdłuż promienia kolumny rdzenia, natomiast uszkodzenie uzwojenia maszyny elektrycznej miało postać zwarć wewnętrznych w zwoju cewki wykonanej przy zastosowaniu przewodu zawierającego kilkadziesiąt równoległych drutów nawojowych. Porównano wybrane sposoby oceny uszkodzeń uzwojeń badanych metodą częstotliwościową.

Zasady wykrywania uszkodzeń uzwojeń transformatorów

W metodzie analizy odpowiedzi częstotliwościowej wykorzystywane są związki między uszkodzeniami a sprzężeniami indukcyjno-pojemnościowymi pomiędzy elementami uzwojeń. Odkształcenie uzwojenia, przesunięcie zwoju, cewki lub całego uzwojenia wiąże się ze zmianą pojemności lub indukcyjności rozproszenia. Identyfikacja uszkodzeń uzwojeń jest dokonywana głównie na podstawie analizy zmian funkcji przenoszenia lub admitancji transformatorów spowodowanych uszkodzeniem [4-8]. Funkcje przenoszenia są definiowane za pomocą zależności:

$$(1) \quad TF(f) = \frac{X(f)}{U_z(f)}$$

gdzie: $X(f)$ - napięcie wyjściowe lub prąd wejściowy albo prąd wyjściowy transformatora, $U_z(f)$ - napięcie zasilania, f - częstotliwość napięcia.

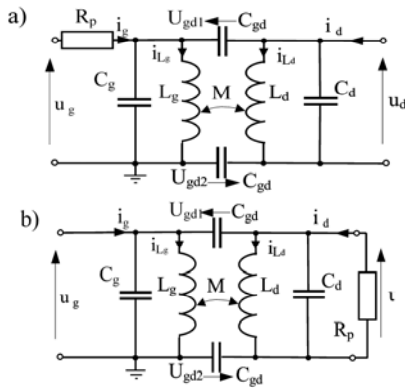
W przypadku, gdy napięcie i prąd odnoszą się do tego samego uzwojenia, wówczas funkcja przenoszenia reprezentuje admitancję uzwojenia. Uszkodzenia uzwojeń są wykrywane zwykle bezpośrednio na podstawie analizy zmian funkcji przenoszenia bądź admitancji rejestrowanej w różnych momentach okresu eksploatacji.

Gdy zasilane jest uzwojenie górnego napięcia U_g , (rys. 1), a w uzwojeniu dolnego napięcia jest mierzony prąd I_d , to zgodnie ze wzorem (1), funkcja przenoszenia ma postać:

$$(2) \quad TF_{gd}(f) = \frac{I_d(f)}{U_g(f)}$$

W przypadku zasilania uzwojenia górnego napięcia i pomiaru prądu w tym uzwojeniu I_g admitancja wejściowa jest wyrażona wzorem:

$$(3) \quad TF_g(f) = \frac{I_g(f)}{U_g(f)}$$



Rys. 1. Model wysokoczęstotliwościowy transformatorów: a - schemat transformatora podczas pomiarów admittancji, b - schemat transformatora podczas pomiarów funkcji przenoszenia, R_p - rezystor pomiarowy

Autorzy zaproponowali kryterium oceny uszkodzeń uzwojeń, którego podstawę stanowią łącznie wyniki rejestracji funkcji przenoszenia i admittancji transformatora. Proponowany sposób wykrywania uszkodzeń opiera się na analizie stosunku $TFD(f)$ admittancji i funkcji przenoszenia wyrażonego wzorem:

$$(4) \quad TFD_{x-xy}(f) = \frac{Y_x(f)}{TF_{xy}(f)}$$

gdzie: Y_x - admittancja uzwojenia x , TF_{xy} - funkcja przenoszenia rejestrowana po zasileniu strony x i pomiarze prądu po stronie y transformatora (wzór (1)) dla odpowiednich uzwojeń transformatora [9]. Dla układu przedstawionego na rysunku 1 stosunki te mają postać:

$$(5) \quad TFD_{g-gd}(f) = \frac{TF_g(f)}{TF_{gd}(f)}$$

$$(6) \quad TFD_{d-dg}(f) = \frac{TF_d(f)}{TF_{dg}(f)}$$

i reprezentują sprzężenia elektromagnetyczne w transformatorze zależne od właściwości materiałów i konstrukcji uzwojeń. Biorąc pod uwagę zależności: $L_g < M$, $L_d < M$ oraz zaniedbując wpływ rezystora R_p na wyniki pomiarów, można zapisać iloraz $TFD_{g-gd}(f)$ w następującej postaci:

$$(7) \quad TFD_{g-gd}(f) = \frac{TF_g(f)}{TF_{gd}(f)} \cong \frac{1}{M(C_d + \frac{C_{gd}}{2})} \frac{1 + \omega^2 M C_{gd} - \omega^4 M^2 (C_g C_d + C_d \frac{C_{gd}}{2})}{\omega^2 (1 - \omega^2 M \frac{C_{gd}}{2})}$$

Struktura zależności częstotliwościowej funkcji dyskryminacji $TFD_{d-dg}(f)$ przedstawionej w postaci ogólnej wzorem (6) jest podobna do struktury równania (7). Reprezentuje ono sprzężenia wewnętrzne indukcyjne i pojemnościowe.

Podstawą proponowanego kryterium oceny uszkodzeń uzwojeń są jednoznaczne związki między zmianami zależności $TFD(f)$ a zmianami parametrów elektrycznych transformatorów spowodowanych uszkodzeniami. W oparciu o te zależności sformułowano kryterium rozpoznawania

uszkodzeń uzwojeń przy zastosowaniu pomiarów admittancji i funkcji przenoszenia. Zmiany funkcji $TFD(f)$, będących konsekwencją uszkodzeń uzwojeń, mogą być analizowane przy zastosowaniu wzoru (7). Po jego zróżniczkowaniu uzyskuje się zależność:

$$(8) \quad \frac{dTFD}{d\omega} = \frac{1}{M(C_d + \frac{C_{gd}}{2})} \frac{-1 + \omega^2 M \frac{C_{gd}}{2} + \omega^4 M^2 (\frac{C_{gd}^2}{2} - C_g C_d - C_g \frac{C_{gd}}{2} - C_d \frac{C_{gd}}{2})}{\frac{\omega^3}{2} (1 - \omega^2 M \frac{C_{gd}}{2})^2}$$

z której wynika, że częstotliwość przy której iloraz TFD osiąga wartość maksymalną wyraża wzór:

$$(9) \quad \omega_{rez} = \sqrt{\frac{\sqrt{\frac{3}{2} - \frac{C_g C_d}{C_{gd}^2} - \frac{C_g + C_d}{2 C_{gd}} - 1}}{M [C_{gd} - \frac{2 C_g C_d}{C_{gd}} - (C_g + C_d)]}}$$

który przy założeniu, że $C_g < C_{gd}$ i $C_d < C_{gd}$ przyjmuje następującą postać:

$$(10) \quad \omega_{rez} \cong \sqrt{\frac{1}{M C_{gd}}}$$

Ze wzorów (8) i (10) widać, że jeśli indukcyjność między uzwojeniami maleje, np. na skutek zwarcia między zwojami, to wzrasta częstotliwość, przy której funkcja $TFD(f)$ osiąga maksimum. Z zależności (8) po uwzględnieniu wzoru (10), uzyskuje się następujące wyrażenie:

$$(11) \quad TFD_{max} = \frac{4 C_{gd}^2 - 2 C_g C_d - C_g C_{gd} - C_d C_{gd}}{C_{gd} (2 C_d + C_{gd})}$$

na wartość maksymalną ilorazu TFD . Wpływ zmian pojemności C_{gd} oraz C_d , związanych z przemieszczeniem uzwojeń, na zmiany wartości maksymalnych uwidaczniają następujące zależności:

$$(12) \quad \frac{dTFD_{max}}{dC_{gd}} = \frac{C_{gd}(C_g + C_d) + 8C_d(C_{gd} + C_d)}{C_{gd}(2C_d + C_{gd})^2}$$

$$(13) \quad \frac{dTFD_{max}}{dC_d} = \frac{-9C_{gd}}{(2C_d + C_{gd})^2}$$

Z analizy wzorów (11–13) wynika, że ze wzrostem pojemności między uzwojeniem a rdzeniem rosną także wartości maksymalne TFD . Zmniejszanie tej pojemności ma natomiast swoje odzwierciedlenie w postaci malejących wartości maksymalnych TFD . Wzrost pojemności między uzwojeniem a rdzeniem może być spowodowany przemieszczeniem uzwojenia w kierunku rdzenia wzdłuż promienia kolumny.

Wyniki pomiarów ilustrujące reakcję transformatora na przesunięcie promieniowe uzwojenia przedstawiono w dalszej części artykułu. Umożliwiły one analizę porównawczą obu przedstawionych sposobów wykrywania uszkodzeń uzwojeń transformatorów badanych metodą częstotliwościową.

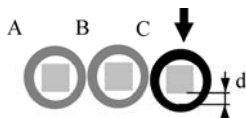
Badania uszkodzeń uzwojeń transformatorów

Analizę przedstawionych metod rozpoznawania uszkodzeń uzwojeń transformatorów przeprowadzono na podstawie wybranego uszkodzenia transformatora o mocy

znamionowej 250 kVA i napięciu 15,75/0,4 kV (Dyn5). Podstawą analizy były doświadczalne zależności admittancji i funkcji przenoszenia transformatora wyznaczonej na podstawie zależności (1). Napięcie wymuszające sinusoidalne o częstotliwości zmieniającej się z zadaniem krokiem było przykładane do zacisków jednej fazy transformatora. Dla dyskretnych wartości częstotliwości zmierzono napięcie zasilające oraz prąd w uzwojeniu zasilanym - przy wyznaczaniu admittancji - lub w uzwojeniu wtórnym tej samej fazy - przy wyznaczaniu funkcji przenoszenia transformatora [10].

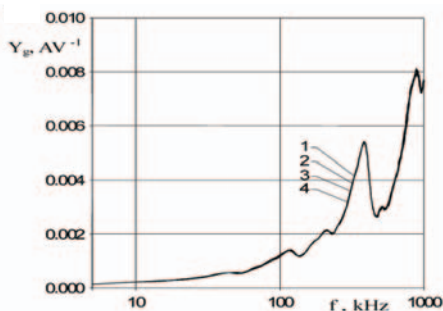
Uszkodzenia transformatora doświadczalnego miały postać przemieszczeń uzwojeń jednej fazy wzdłuż promienia kolumny rdzenia (rys. 2). W celu porównania obu przedstawionych sposobów oceny uszkodzeń uzwojeń transformatorów wykonano rejestracje zależności częstotliwościowych admittancji i funkcji przenoszenia transformatora. Rejestrowano admittancję uzwojenia fazy C strony górnego napięcia (Y_g). Funkcję przenoszenia wyznaczono natomiast dla następującego układu pomiarowego:

- zasilanie - strona górnego napięcia (zaciski faz A i C),
- pomiar prądu - strona dolnego napięcia (zacisk fazy C - punkt neutralny) - TF_{gd} .



Rys. 2. Schemat uszkodzenia doświadczalnego uzwojeń transformatora: d - przemieszczenie uzwojeń jednej fazy względem kolumny rdzenia

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Poszczególne krzywe wyznaczone w wybranych położeniach d uzwojenia fazy C przemieszczanego względem kolumny rdzenia (rys. 2).

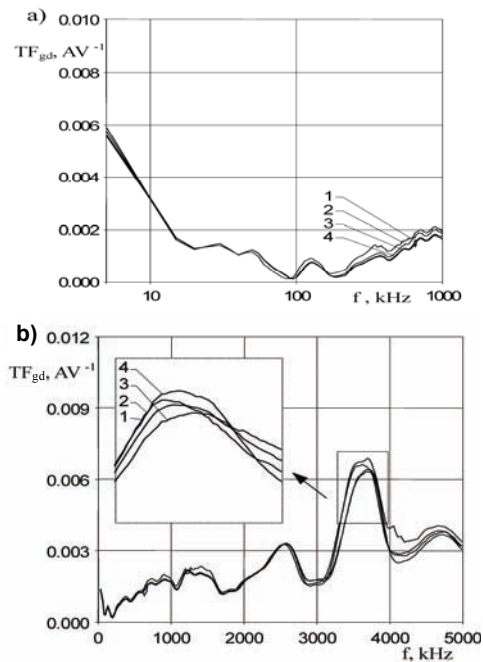


Rys. 3. Zależności $Y_g(f)$ w zakresie częstotliwości do 1 MHz po przesunięciu promieniowym uzwojeń: 1 - $d = 0$ mm (stan wyjściowy), 2 - $d = 3$ mm, 3 - $d = 6$ mm, 4 - $d = 8$ mm (rys. 2)

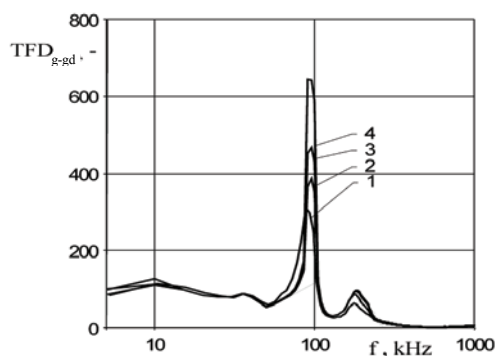
Przemieszczenie uzwojenia uwiadcza się w postaci zmian przebiegów zależności częstotliwościowych admittancji uzwojeń oraz funkcji przenoszenia transformatora. Największe zmiany wartości funkcji przenoszenia są widoczne przy częstotliwości około 3,75 MHz.

Metoda zaproponowana przez autorów wymaga wykorzystania funkcji $TFD(f)$ (wzory: (5) (6)) transformatora. Wykresy krzywych $TFD_{g-gd}(f)$, wyznaczone na podstawie wyników rejestracji zamieszczonych na rysunku 4, przedstawiono na rysunku 5. Z analizy wykresów wynika, że uszkodzenia uzwojenia powodują wyraźne zmiany kształtów krzywych $TFD_{g-gd}(f)$. Największe wartości maksymalne TFD osiągają przy częstotliwości około 92 kHz. Z porównania zmian zależności $Y_g(f)$ i $TF_{gd}(f)$ ze zmianami funkcji $TFD_{g-gd}(f)$, spowodowanymi tymi samymi uszkodzeniami uzwojenia, wynika, że metoda oceny uszkodzeń transformatorów w oparciu o analizę zależności TFD wyróżnia się dużą czułością. Z wykresów przedstawionych na rysunku 5 widać, że po

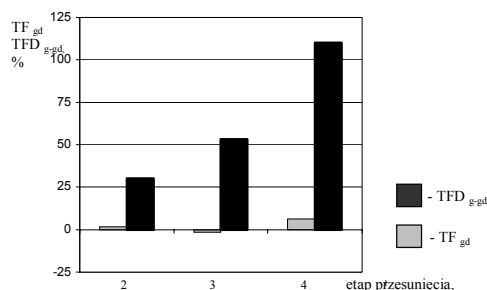
przemieszczeniu wzdłuż promienia uzwojeń o odległość d (rys. 2), wynoszącą 8 mm tj. stanowiącą 2,64 % największego wymiaru zewnętrznego uzwojenia wartości maksymalne ilorazu TFD_{g-gd} ulegają zmianie o około 110% (rys.6).



Rys. 4. Zależności $TF_{gd}(f)$ po przesunięciu promieniowym uzwojeń: a - zależności w zakresie częstotliwości 0,5 - 1 MHz, b - zależności w zakresie częstotliwości 0,5 - 5 MHz: 1 - $d = 0$ mm (stan wyjściowy), 2 - $d = 3$ mm, 3 - $d = 6$ mm, 4 - $d = 8$ mm (rys. 2)



Rys. 5. Zależności $TFD_{g-gd}(f)$ transformatora po przemieszczeniu promieniowym uzwojeń: 1 - $d = 0$ mm (stan wyjściowy), 2 - $d = 3$ mm, 3 - $d = 6$ mm, 4 - $d = 8$ mm (rys. 2)



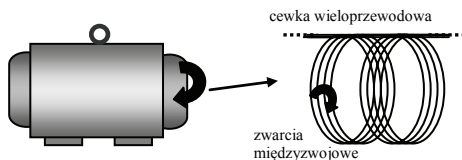
Rys. 6. Zmiany wartości maksymalnych względnych TF_{gd} oraz TFD_{g-gd} w funkcji kolejnych etapów przemieszczania uzwojenia (rys. 4, rys. 5)

Zakres zmian zależności częstotliwościowych TFD_{g-gd} (rys.5), związanych z uszkodzeniem uzwojenia, jest więc znacznie większy od zakresu zmian przebiegów admittancji

lub funkcji przenoszenia (rys. 6). Na podstawie analizy przebiegów *TFD* możliwe jest więc rozpoznawanie nawet niewielkich przemieszczeń uzwojeń transformatorów.

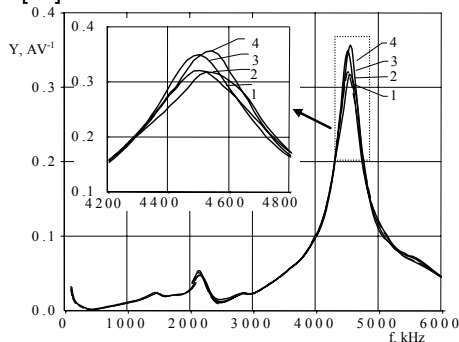
Wykrywanie uszkodzeń uzwojeń maszyn elektrycznych

Możliwość zastosowania metody częstotliwościowej do wykrywania uszkodzeń uzwojeń maszyn elektrycznych ilustrują wyniki badań nietypowej cewki uzwojenia generatora elektrycznego wiatrowego o mocy 660 kW i napięciu 690 V. Jest to uzwojenie dwuwarstwowe rombów połączone w trójkąt. Cewki uzwojenia są wykonane przy zastosowaniu nietypowego przewodu. Jest on złożony z 30 równoległych drutów nawojowych o średnicy 1,6 mm. Każda cewka uzwojenia zawiera 16 zwojów (rys. 7).

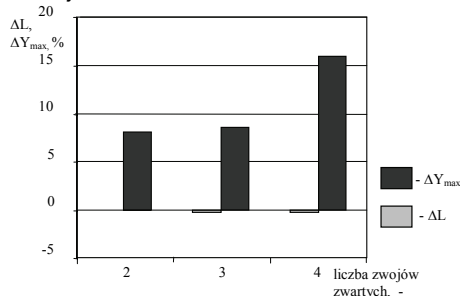


Rys. 7. Schemat uszkodzeń cewki uzwojenia generatora wiatrowego

W praktyce zdarzają się zwarcia pomiędzy drutami równoległymi przewodów nawojowych. W wyniku takich uszkodzeń tworzą się zwoje zwarte, w których płyną prądy powodujące straty energii oraz zwiększenie lokalne temperatury uzwojenia. Uszkodzenia takie ujawniają się jednak w postaci wyraźnych zmian przebiegów zależności częstotliwościowych admitancji. Z wykresów przedstawionych na rysunku 8 widać, że ze wzrostem liczby zwartych zwojów cewki generatora wzrastają wartości maksymalne admitancji występujące przy częstotliwości 4,35 MHz [11].



Rys. 8. Przebiegi doświadczalne admitancji cewki uzwojenia generatora wiatrowego po kolejnych etapach uszkodzania: 1 - admitancja uzwojenia nieuszkodzonego, 2,3,4 - admitancje uzwojenia ze zwartymi kolejno: dwoma, trzema i czterema sąsiednimi zwojami



Rys. 9. Różnice między wartościami względnymi indukcyjności uzwojenia ΔL po zwarcu kolejnych zwojów oraz różnice między wartościami maksymalnymi względnymi admitancji ΔY_{max} po zwarcu kolejnych zwojów, wyznaczone w zależności od liczby zwartych zwojów

W czasie badań nie stwierdzono zmian wartości rezystancji po zwarcu kolejnych zwojów uzwojenia. Wartości indukcyjności uzwojenia ulegały wówczas tylko

nieznacznemu zmniejszeniu. Wpływ liczby zwojów zwartych na zmianę wartości maksymalnych zależności częstotliwościowych admitancji i wartości indukcyjności uzwojenia przedstawiono na rysunku 9. Wyniki badań potwierdzają, że uszkodzenia uzwojenia generatora wiatrowego, wynikające ze zwarć sąsiednich zwojów powodują tylko nieznacznie wartości indukcyjności, ale w zdecydowany sposób zmieniają wartości maksymalne admitancji cewki. Wykrywanie takich uszkodzeń uzwojeń jest więc możliwe przez stosowanie metody częstotliwościowej.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono różne metody oceny uszkodzeń uzwojeń na podstawie analizy wyników pomiarów zależności częstotliwościowych admitancji i funkcji przenoszenia. Zamieszczono wyniki badań obejmujące uszkodzenia o różnym charakterze, wykonane przy zastosowaniu uzwojeń o zróżnicowanych konstrukcjach i parametrach. Potwierdzają one możliwość wykrywania niewielkich uszkodzeń uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych.

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] Awadallah M. A., Morcos M. M., Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drivers - an overview. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 18, 2003, pp. 245-251
- [3] Florkowski M., Furgał J., Saaranen J., Motor winding quality assessment based on frequency Response Analysis *13th Int. Symp. on High Voltage Engineering ISH'2003* (Delft, 2003), paper 220
- [4] Wang M., Vandermaar A. J., Srivastava K. D., Improved Detection of Power Transformer Winding Movement by Extending the FRA High Frequency Range. *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 20, No.3, July, 2005, pp. 1930 - 1938
- [5] 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
- [6] Nirgude P. M., Gunasekaran B., Rajkumar A. D., Singh B. P., Investigations on Axial Displacement of Transformer Winding by Frequency Response Technique. *Proc. of the XIVth Int. Symp. on High Voltage Eng.*, Tsinghua Univ., Beijing, China, Aug. 25 - 29, 2005, paper F - 47
- [7] 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
- [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 Volt. Eng. ISH'2005*, Beijing, China, Aug. 25 - 29, 2005, paper G - 098
- [9] Florkowski M., Furgał J., Transformer winding defects identification based on a high frequency method. *Meas. Scien. and Techn.*, 18, 2007, pp. 2827-2835
- [10] Florkowski M., Transfer Function Based Diagnostics of Transformers - FRA User Guide. *ABB Corporate Research - 1999*
- [11] Florkowski M., Furgał J., The Detection of Winding Faults in Electrical Machines Using the Frequency Response Analysis Method. *Meas. Scien. and Techn.*, 2004, No. 15, pp. 2067-2074

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