



Marek FLORKOWSKI¹, Jakub FURGAŁ²

ABB Corporate Research - Kraków (1), Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki (2)

Analiza uszkodzeń uzwojeń na podstawie obliczeń odpowiedzi częstotliwościowej

Streszczenie: Przedstawiony model matematyczny uzwojeń został zastosowany w badaniach uszkodzeń uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych prowadzonych metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej. Zamieszczono wyniki obliczeń admitancji uszkodzanych uzwojeń transformatorów rozdzielczych i silników elektrycznych. Wyniki badań teoretycznych porównano z wynikami eksperymentów.

Abstract: (Analysis of winding failures based on calculations of frequency response). The presented mathematical model of winding was used to investigate both transformer and electric machine winding failures. Investigations were made by use of the frequency response method. Calculation results of admittance of windings with turn-to-turn faults of medium voltage transformers and electrical machines were presented. The simulations results were compared with experiments.

Słowa kluczowe: modelowanie matematyczne uzwojeń, badania diagnostyczne, metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej.

Keywords: mathematical modelling of windings, diagnostic investigations, the frequency response analysis method.

Wprowadzenie

Badania odkształceń lub uszkodzeń uzwojeń transformatorów są wykonywane coraz częściej przy zastosowaniu metody analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA - Frequency Response Analysis). Nowością jest badanie przy użyciu tej metody również uzwojeń maszyn elektrycznych. Jej podstawą są wyniki badań eksperymentalnych funkcji przenoszenia lub admitancji uzwojeń [1,2,3]. Stan techniczny uzwojenia jest oceniany na podstawie analizy porównawczej zależności częstotliwościowych funkcji przenoszenia lub admitancji uzwojenia rejestrowanych w różnych okresach eksploatacji. Używane są także w tym celu charakterystyki różnych faz tego samego urządzenia lub urządzeń bliźniaczych.

W badaniach uszkodzeń uzwojeń metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej wykorzystuje się związki między deformacjami uzwojenia a zmianami jego parametrów elektrycznych. Zmiana kształtu uzwojenia, przesunięcie zwoju, cewki, całego uzwojenia lub zwarcie zwojów powoduje zmianę lokalnych pojemności lub indukcyjności. Z tym wiąże się zmiana przebiegu zależności częstotliwościowej funkcji przenoszenia lub admitancji uzwojenia. Wyznaczone zależności są porównywane z przebiegami zarejestrowanymi wcześniej. Odmienne kształty tych funkcji świadczą o przemieszczeniu lub uszkodzeniu uzwojenia [4,5].

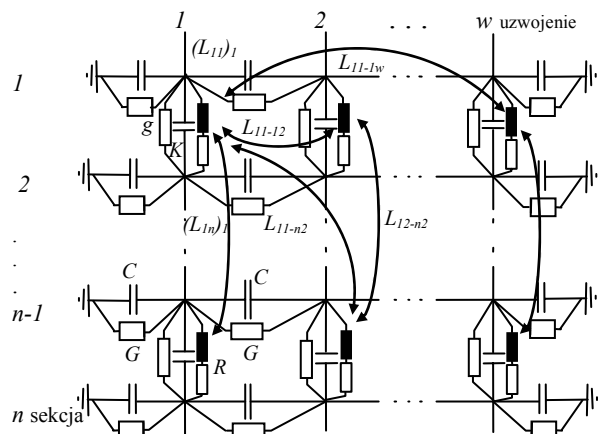
Trwają intensywne prace badawcze, których celem jest doskonalenie metody częstotliwościowej wykrywania uszkodzeń uzwojeń. Wyznaczenie zależności między zniekształceniami uzwojeń a zmianami charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia lub admitancji uzwojeń ma w niej podstawowe znaczenie. Do tej pory nie opracowano jednak jednoznacznych kryteriów oceny stanu technicznego uzwojeń. W badaniach prowadzonych w tej dziedzinie są wykorzystywane także wyniki obliczeń funkcji przenoszenia i admitancji uzwojeń. Obliczenia charakterystyk częstotliwościowych transformatorów i maszyn elektrycznych są pomocne przy interpretacji charakterystyk doświadczalnych [6]. Modele matematyczne mogą być użyte do symulowania uszkodzeń uzwojeń. Charakterystyki teoretyczne można porównać z doświadczalnymi i analizować charakter i zakres uszkodzenia lub zniekształcenia uzwojenia. Możliwość wspomagania badań doświadczalnych uzwojeń przez zastosowanie wyników obliczeń

odpowiedzi częstotliwościowej sprawia, że intensywnie rozwijane są prace nad modelowaniem matematycznym uzwojeń w szerokim zakresie częstotliwości.

W artykule przedstawiono model matematyczny uzwojeń bazujący na schemacie zastępczym z parametrami skupionymi. Model zastosowano do obliczeń zależności częstotliwościowych admitancji uzwojeń transformatora oraz silnika elektrycznego, poddawanych wybranym zniekształceniom i uszkodzeniom. Wyniki obliczeń porównano z wynikami badań eksperymentalnych.

Model matematyczny uzwojeń

Schemat zastępczy uzwojeń zastosowany w obliczeniach przedstawiono na rysunku 1. Schemat jest tworzony przez zastąpienie części uzwojeń, cewek, warstw lub ich fragmentów przez indukcyjności własne i wzajemne, pojemności doziemne i wzdlużne, rezystancje uzwojeń oraz konduktancje układu izolacyjnego [7,8].



Rys. 1. Schemat zastępczy uzwojeń

Dla każdego węzła schematu można zapisać następujące równanie:

$$(1) \quad \dot{I}_C(t) + \dot{I}_G(t) + \dot{I}_L(t) = 0$$

gdzie: $\dot{I}_C(t)$, $\dot{I}_G(t)$, $\dot{I}_L(t)$ – macierze prądów w gałęziach pojemnościowych, konduktancyjnych i indukcyjno-rezystancyjnych połączonych z węzłem.

Zależności napięciowo-prądowe dla gałęzi schematu przedstawiają następujące zależności:

$$(2) \quad I'_C(t) = C_g \frac{dU_C(t)}{dt}$$

$$(3) \quad I'_G(t) = G_g U_G(t)$$

$$(4) \quad U_L(t) = L \frac{dI'_L(t)}{dt} + R I'_L(t)$$

gdzie:

$U_C(t), U_G(t), U_L(t)$ - macierze napięć na gałęziach pojemnościowych, konduktancyjnych i indukcyjno-rezystancyjnych,

C_g, G_g, R, L - macierze pojemności, konduktancji, rezystancji i macierze indukcyjności własnych i wzajemnych między sekcjami uzwojenia.

Celem dalszych przekształceń jest wyznaczenie zależności między napięciami na gałęziach i prądami gałęziowymi a napięciami węzłowymi U oraz prądami I . Są one zależne od konfiguracji schematu zastępczego, która jest uwzględniana przez wprowadzenie:

- macierzy łączącej T'_C , której struktura jest zależna od połączeń pojemności w schemacie zastępczym,
- macierzy T'_G , uwzględniającej układ połączeń konduktancji,
- macierzy T'_L , o strukturze zależnej od połączeń indukcyjności w modelu.

Liczba wierszy macierzy T'_C jest równa liczbie pojemności, a liczba kolumn równa się liczbie węzłów w układzie. Macierz zawiera wartości 1 albo -1, umieszczone w przecięciach wierszy macierzy (których numery odpowiadają numerom kondensatorów w obwodzie) i kolumn (z numerami zgodnymi z numerami węzłów, z którymi te pojemności są połączone). Struktura macierzy łączących T'_G i T'_L jest podobna do struktury macierzy T'_C [8].

Konsekwencją zastosowania macierzy łączących jest zastąpienie w równaniach (2-4) napięć gałęziowych napięciami węzłowymi. Po przekształceniach równania (2-4) przyjmują następującą postać:

$$(5) \quad I_C(t) = C \frac{dU(t)}{dt}$$

$$(6) \quad I_G(t) = G U(t)$$

$$(7) \quad U(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} + R I_L(t)$$

gdzie:

$$(8) \quad C = T'^t_C C_g T_C$$

$$(9) \quad G = T'^t_G G_g T_G$$

$$(10) \quad I_L = T'^t_L I'_L$$

Po uwzględnieniu zależności (5), (6) i (10) w równaniu (1) i wzięciu pod uwagę zależności (7) uzyskuje się układ równań reprezentujący związki między napięciami doziemnymi w węzłach a prądami w gałęziach rezystancyjno-indukcyjnych schematu [8]:

$$(11) \quad C \frac{dU(t)}{dt} + G U(t) + T'^t_L I_L(t) = 0$$

$$(12) \quad L \frac{dI_L(t)}{dt} - T'^t_L U(t) + R I_L(t) = 0$$

Warunki brzegowe - wynikające z uziemienia, sposobu połączenia węzłów oraz przyłożenia zewnętrznego źródła

napięcia $u_e(t)$ - są uwzględniane przez wprowadzenie przekształceń układu równań (11-12) polegające na:

- usunięciu w równaniu (11) wiersza z macierzy $U(t)$ oraz T'^t_L , z macierzy T'_L - kolumny, a z macierzy C i G wiersza i kolumny o numerze zgodnym z numerem uziemionego węzła - w przypadku uziemienia węzła schematu,
- dodaniu do siebie odpowiednio: wierszy oraz kolumn w macierzy C , a także kolumn w macierzy T'_L (wierszy w macierzy T'^t_L) o numerach zgodnych z numerami węzłów połączonych - w przypadku połączenia węzłów schematu.

Po dołączeniu do węzła k schematu zewnętrznego źródła napięcia $u_e(t)$ niewiadome napięcie $u_k(t)$ w układzie równań (11-12) jest zastępowane znaną funkcją $u_e(t)$. Przekształcenia macierzy są wówczas podobne do przekształceń wykonywanych w przypadku uziemienia węzła. Wtedy jednak kolumna C_u , z czynnikiem $du_e(t)/dt$, oraz kolumny G_u i T'_{Lu} , z czynnikiem $u_e(t)$, są przenoszone na prawą stronę równania [8].

Po tych przekształceniach układy równań (11) i (12) są zapisane w postaci:

$$(13) \quad C \frac{dU(t)}{dt} + G U(t) + T'^t_L I(t) = -C_u \frac{du_e(t)}{dt} - G_u u_e(t)$$

$$(14) \quad L \frac{dI_L(t)}{dt} - T'_{Lu} U(t) + R I_L(t) = T'_{Lu} u_e(t)$$

gdzie:

C_w, G_w - wektory, stanowiące fragmenty macierzy C i G zawierające odpowiednio pojemności i konduktancje między węzłem do którego przyłożono napięcie zewnętrzne $u_e(t)$ a węzłami sąsiednimi,

T'_{Lu} - macierz, którą stanowi kolumna macierzy T'_L , o numerze zgodnym z numerem węzła, do którego przyłożono napięcie zewnętrzne $u_e(t)$ [8].

W układzie równań (13-14) macierze: U, C, G, T'_L, T'^t_L oraz C_w, G_w i T'_{Lu} nie zawierają wierszy i kolumn usuniętych uprzednio w celu uwzględnienia warunków brzegowych.

W przypadku, gdy przebieg napięcia wymuszającego $u_e(t)$ jest sinusoidalny układ równań (13-14) można przedstawić w postaci [9]:

$$(15) \quad (j\omega C + G) U + T'^t_L I_L = - (j\omega C_w + G_w) U_e$$

$$(16) \quad (j\omega L + R) I_L - T'_{Lu} U = T'_{Lu} U_e$$

który w uproszczonej formie jest zapisywany następująco:

$$(17) \quad Y U + T'^t_L I_L = - Y_u U_e$$

$$(18) \quad Z I_L - T'_{Lu} U = T'_{Lu} U_e$$

Po przekształceniach równania (17-18) są przedstawione w następującej formie:

$$(19) \quad U = (Y + T'^t_L Z^{-1} T'_{Lu})^{-1} (T'^t_L Z^{-1} T'_{Lu} U_e + Y_u U_e)$$

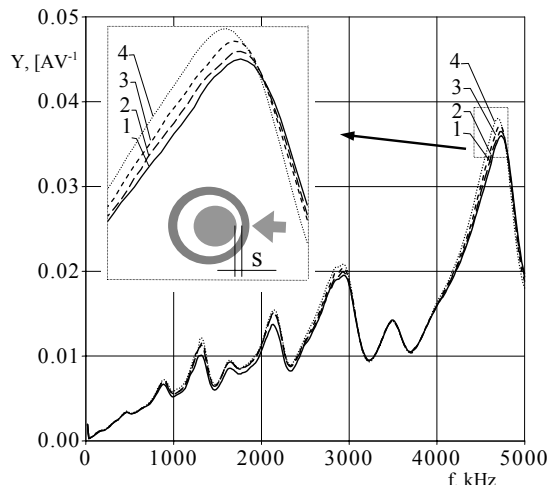
$$(20) \quad I_L = Z^{-1} (T'_{Lu} U + T'_{Lu} U_e)$$

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

Równania (14) i (15) mogą być użyte do obliczeń wektorów napięć doziemnych U w węzłach oraz prądów I w gałęziach indukcyjno-rezystancyjnych schematu zastępczego uzwojenia.

Struktury macierzy admitancji Y, Y_u , impedancji Z oraz macierzy łączących T'_L i T'_{Lu} przedstawiają zależności (21), (22) i (23) [8].

Stosując przedstawiony model matematyczny wykonano obliczenia zależności admittancji uzwojenia od częstotliwości w wybranych położeniach uzwojenia względem kolumny. W obliczeniach każda warstwa uzwojenia była modelowana tak, jak gdyby stanowiła oddzielne uzwojenie ($w=7$ - rys.1) odpowiednio połączone z sąsiednimi. Poszczególne warstwy podzielono na osiem sekcji ($n=8$ - rys.1). Celem obliczeń było potwierdzenie możliwości prowadzenia analizy zniekształceń uzwojeń na podstawie zmian kształtów teoretycznych charakterystyk częstotliwościowych wyznaczonych po uwzględnieniu zmian parametrów elektrycznych uzwojenia związanych z zniekształceniem. Rozpoznanie charakteru tych zależności ma podstawowe znaczenie dla identyfikacji uszkodzeń uzwojeń badanych metodą odpowiedzi częstotliwościowej.

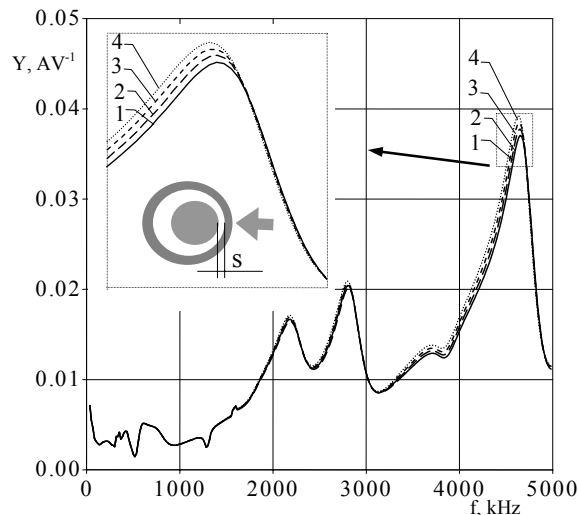


Rys. 2. Krzywe eksperymentalne admittancji uzwojenia przemieszczanego wzdłuż promienia kolumny rdzenia: 1 - $s = 0,6$ cm (uzwojenie przed przemieszczaniem); 2 - $s = 0,4$ cm; 3 - $s = 0,2$ cm; 4 - $s = 0$ cm

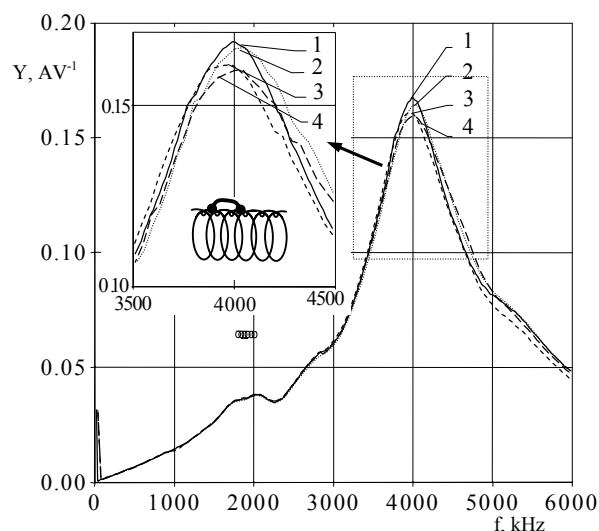
W obliczeniach uwzględniono tylko zmiany pojemności między przemieszczanym uzwojeniem a rdzeniem. Wyniki obliczeń admittancji uzwojenia przemieszczanego wzdłuż promienia kolumny rdzenia przedstawiono na rysunku 3. Do identyfikacji uszkodzenia wybrano fragment charakterystyki w zakresie 4-5 MHz ze względu na największy wpływ przemieszczenia uzwojenia na wartości admittancji w tym zakresie częstotliwości.

Drugim obiektem doświadczalnym był silnik elektryczny asynchroniczny o mocy 3 kW; 0,4/0,23 kV [20]. Uzwojenie stojana silnika doświadczalnego jest wykonane jako trapezowe rozmieszczone w 36 żłobkach. Długość jednej cewki uzwojenia wynosi 230 mm, a szerokość 145 mm. Uszkodzenia uzwojenia miały postać zwarć dwu, trzech oraz czterech sąsiednich zwojów w części uzwojenia położonej poza rdzeniem.

Obliczenia zależności częstotliwościowych admittancji uzwojenia silnika poprzedzały rejestracje tych zależności. Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono na rysunku 4. Efektem uszkodzenia uzwojenia jest zmniejszenie liczby zwojów, którego konsekwencją jest zmniejszenie zarówno indukcyjności własnej jak i indukcyjności wzajemnych między sąsiednimi cewkami uzwojenia. Jak wynika z pomiarów, wykonanych miernikiem cyfrowym LCR typu Escort ELC-3131D, zwarcie kolejnych zwojów powodowało systematycznie zmniejszenie indukcyjności uzwojenia, z 18,07 mH, dla uzwojenia nieuszkodzonego, do 17,31 mH, dla uzwojenia ze zwartymi czterema sąsiednimi zwojami.

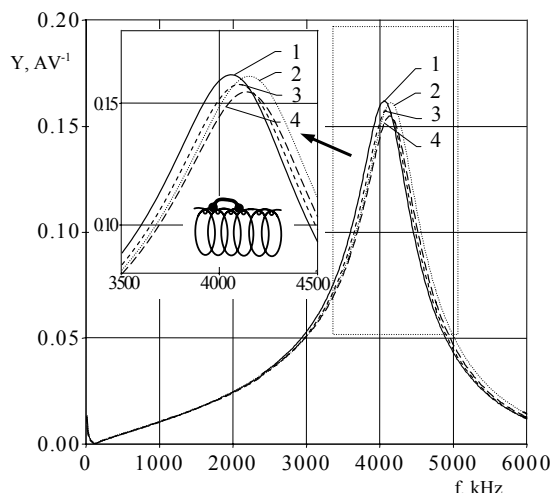


Rys. 3. Przebiegi teoretyczne zależności częstotliwościowych admittancji uzwojenia przemieszczanego wzdłuż promienia kolumny rdzenia: 1 - $s = 0,6$ cm (uzwojenie przed przemieszczeniem); 2 - $s = 0,4$ cm; 3 - $s = 0,2$ cm; 4 - $s = 0$ cm



Rys. 4. Przebiegi doświadczalne admittancji uzwojenia jednej fazy silnika elektrycznego po kolejnych etapach uszkodzenia: 1 - admittancja uzwojenia nieuszkodzonego, 2,3,4 - admittancje uzwojenia ze zwartymi kolejno: dwoma, trzema i czterema zwojami sąsiednimi

Pojemność między uzwojeniem a rdzeniem oraz wartość rezystancji uzwojenia nie ulegały natomiast praktycznie zmianie podczas badań. Rozłożenie zwieranych zwojów w żłobkach stojana jest przypadkowe. Powoduje to nieregularne zmiany indukcyjności wzajemnych pomiędzy uszkodzoną cewką a cewkami sąsiednimi. Zmiany te uwidaczniają się na wykresach przypadkowymi zmianami wartości maksymalnych funkcji częstotliwościowych admittancji uzwojenia po zwarciach kolejnych zwojów. Wyniki obliczeń zależności częstotliwościowych admittancji jednej fazy silnika przedstawiono na rysunku 5. Uszkodzenie uzwojenia uwzględniono w obliczeniach przez zmniejszenie w modelu wartości indukcyjności uszkodzonej cewki, odpowiednie do zmian tej wartości stwierdzonej w wyniku pomiarów tj. maksymalnie o 4,2 %. Zmniejszono wartości indukcyjności własnej jednej cewki oraz indukcyjności wzajemnych między uszkodzoną cewką a cewkami sąsiednimi uzwojenia.



Rys. 5. Przebiegi teoretyczne admitancji uzwojenia jednej fazy silnika elektrycznego przed uszkodzeniem i po zwarceniu dwu sąsiednich zwojów: 1 - uzwojenie przed uszkodzeniem, 2 - uzwojenie ze zwartymi dwoma sąsiednimi zwojami

Podsumowanie

Przedstawiony model matematyczny uzwojeń stosowano do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych uzwojeń o zróżnicowanych konstrukcjach i parametrach. Badania obejmowały uszkodzenia o różnym charakterze uzwojeń. Uzwojenie transformatora energetycznego poddawano działaniu sił przemieszczających go jednostronnie do kolumny rdzenia. Uszkodzenia uzwojenia maszyny elektrycznej wynikały ze zwarcie sąsiednich zwojów. Na podstawie badań wykazano, że zbliżanie uzwojenia w kierunku kolumny uwidacznia się wzrostem wartości maksymalnych charakterystyk częstotliwościowych admitancji. Wynikają one głównie ze zmian pojemności między uzwojeniem a rdzeniem transformatora. Uszkodzenia uzwojeń maszyny powodowały zmniejszenie wartości maksymalnych funkcji częstotliwościowych admitancji. Były one efektem zmniejszenia indukcyjności uzwojenia w wyniku zwarcie wewnętrznych.

Z obliczeń wynika, że uwzględnienie w modelu matematycznym zmian parametrów elektrycznych uzwojeń, spowodowanych uszkodzeniami, prowadzi do zmian przebiegów teoretycznych charakterystyk częstotliwościowych admitancji zbliżonych do zależności eksperymentalnych. Obliczenia potwierdzają przydatność przedstawionego modelu matematycznego w badaniach uszkodzeń uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych.

LITERATURA

[1] Malewski R., Poulin B.: Impulse Testing of Power Transformers Using the Transfer Function Method. *IEEE Trans. on Pow. Del.*, 1988, No. 3, pp. 476 - 489

[2] Awadallah M. A., Morcos M. M.: Application of AI tools in Fault Diagnostisis of Electrical Machines and Drivers - an Overview *IEEE Trans. on En. Conv.*, No. 8, 2003, pp. 245 - 251

[3] Florkowski M., Furgał J., Saaranen J.: Motor Wwinding Quality Assessment Based on Frequency Response Analysis *13th Int. Symp. on High Voltage Engineering ISH'2003* (Delft), 2003, paper 220

[4] 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

[5] Wang M., Vandermaar A. J.: Evaluation of Frequency Response Analysis Data. *12th Int. Symp. on High Voltage Engineering*, 2001, pap. 6 - 27

[6] Malewski R., Szrot M., Zaleski R.: Postępy w modelowaniu transformatora do wykrywania odkształceń uzwojeń. *Energetyka - Zeszyt Temat. Nr VI: Konf. Nauk.-Techn.: Kolobrzeg-Dźwirzyno*, 20 - 22 kwietnia 2005, str. 1-10

[7] 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 Volt. Eng.*, 2001, pap. 7 - 41

[8] Florkowski M., Furgał J.: Experimental and Theoretical Determination of Transfer Function of Transformer Windings. *Arch. of Electr. Engineering.*, Warsaw, Vol. LII, No. 2, 2003, pp. 137 - 152

[9] 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

[10] Mobello E.E., Möller K.: New Power Transformer Model for the Calculation of Electromagnetic Resonant Transient Phenomena Including Frequency-Dependent Losses. *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 15, No 1, Jan., 2000, pp. 167 - 174

[11] Shibuya Y., Fujita S.: High Frequency Model and Transient Response of Transformer Windings. *Transm. and Distrib. Conf. And Exhib., Asia Pacific, IEEE/PES*, Vol. 3, 2002, pp. 1839 - 1844

[12] Massarini A., Kazimierczuk M. K., Grandi G.: Lumped Parameter Model for Single-and Multiple-Layer Inductors. *Proc. Power Electron. Specialist. Conf. (Baveno)*, June 1996, pp. 295 - 301

[13] 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

[14] de Leon F., Semlyen A.: Detailed Modelling of Eddy Current Effects for Transformer Transients. *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 9, No 2, April, 1994, pp. 1143 - 1150

[15] Grandi G, Casadei D, Massarini A.: High frequency lumped parameter model for ac motor windings. *EPE Conf. Proc. 1997*, pp. 2.578-2.583

[16] Heller B., Veverka A.: Surge phenomena in electrical machines *London Iliffe Books Ltd*, 1968

[17] Guardado J.L., Cornick K.J. A.: Computer model for calculating steep-fronted surge distribution in machine windings. *IEEE Trans. on En. Conv.*, No. 4, 1989, pp. 95-101

[18] Florkowski M., Furgał J.: Detection of Transformer Windings Deformations Based on the Transfer Function - Measurements and Simulations. *Meas. Sc. and Techn.*, No. 14, 2003, pp. 1986 - 1992

[19] Florkowski M.: Transfer Function Based Diagnostics of Transformers - FRA User Guide. *ABB Corporate Research - Int. Report*, 1999

[20] Florkowski M., Furgał J.: The detection of winding faults in electrical machines using the frequency response analysis method. *Meas. Sc. and Techn.*, No. 15, 2004, pp. 2067-2074

Autorzy: dr inż. Marek Florkowski, ABB Corporate Research, 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@uci.agh.edu.pl