

Wpływ parametrów rdzenia i innych uzwojeń transformatora na charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia

Streszczenie. W zakresie częstotliwości do 10 kHz rdzeń transformatora ma decydujący wpływ na kształt charakterystyki częstotliwościowej uzwojenia. Przedstawiono metodę modelowania uwzględniającą laminację rdzenia oraz jego konduktywność. W podanym zakresie częstotliwości występuje rezonans powodowany obecnością innych, w danej chwili niepodlegających pomiarowi, uzwojeń. Pokazano prosty sposób uwzględnienia wpływu tych uzwojeń w modelu o stałych skupionych.

Abstract. In the frequency range up to 10 kHz transformer's core has a principal influence on the shape of the frequency response of the winding. The paper presents a modeling method taking into account the core lamination and its conductivity. In the given frequency range there can be found a resonance caused by the presence of others windings, at the moment not being measured. A simple way to take into account the impact of these windings in the lumped parameter model is shown. (**Influence of the transformer's core and other windings parameters on the characteristics of the frequency response of the winding.**)

Słowa kluczowe: transformator energetyczny, uzwojenia, analiza odpowiedzi częstotliwościowej, FRA.

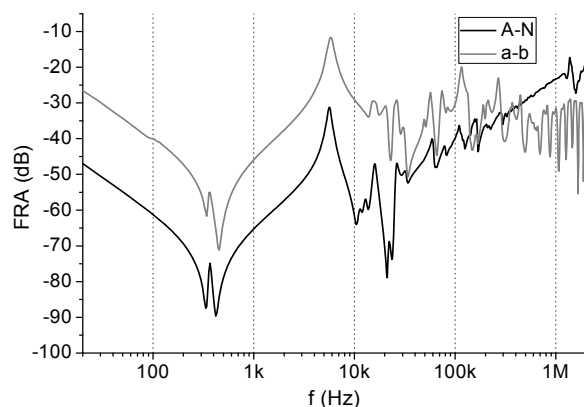
Keywords: power transformer, windings, frequency response analysis, FRA.

doi:10.12915/pe.2014.10.06

Wstęp

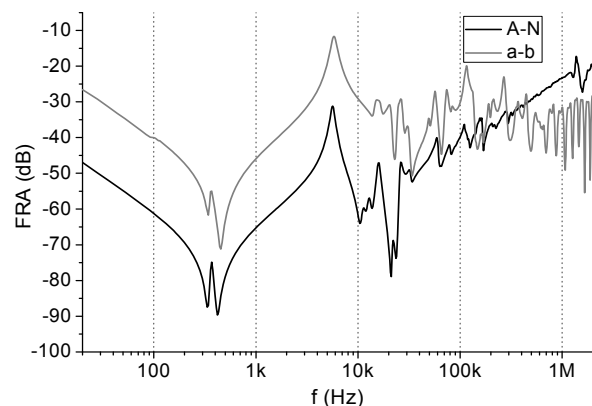
Modelowanie charakterystyki częstotliwościowej uzwojenia transformatora jest przydatne w diagnostyce stanu mechanicznego uzwojenia. Wykonanie kontrolowanych deformacji uzwojenia jest możliwe tylko w rzadkich przypadkach jednostek przeznaczonych do złomowania. Z tego powodu jedynie metody symulacyjne mogą dać odpowiedź na pytanie, jak różne rodzaje deformacji wpływają na odpowiedź częstotliwościową uzwojenia. Wcześniejsze prace pokazują bardzo dobrą zgodność charakterystyk symulowanych ze zmierzonymi dla uzwojeń zdjętych z rdzenia [1]. W przypadku cewek znajdujących się na rdzeniu w zakresie częstotliwości do 10 kHz o przebiegu odpowiedzi decydują parametry rdzenia, z kolei przy wysokich częstotliwościach, powyżej 100 kHz, obecność rdzenia traci na znaczeniu.

Wyniki badania metodą FRA znacznej liczby transformatorów dużej i średniej mocy wykazują istnienie przy częstotliwości około 1 kHz pierwszego znaczącego rezonansu. Częstotliwość występowania tego rezonansu zależy od mocy transformatora, dla małych transformatorów przesuwają się w stronę większych wartości, zazwyczaj kilku kiloherców, dla jednostek dużych geometrycznie jest to poziom kilkuset herców. Tak niska częstotliwość rezonansowa wskazywałaby na istnienie dużej pojemności, której w mierzonych uzwojeniach nie ma. Poza tym, jak pokazano na rysunkach 1, 2 i 3, rezonans ten dla wszystkich uzwojeń danego transformatora występuje przy tej samej częstotliwości i ma podobny kształt.

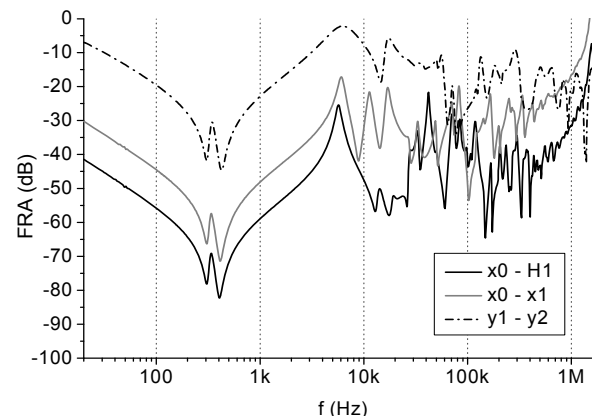


Rys.1. Odpowiedź częstotliwościowa uzwojeń transformatora TORb 10000/110, 115/22 kV, 10 MVA, YNd11

Szczególnie dobrze widać to na rysunku 3 dla autotransformatora z uzwojeniem wyrównawczym y1-y2, którego odpowiedź zawiera taki sam rezonans, pomimo innej konstrukcji, gabarytów i układu połączeń. Można zatem wnioskować, że rezonans ten nie zależy od badanego uzwojenia.



Rys.2. Odpowiedź częstotliwościowa uzwojeń transformatora TNARBA-25000/110PNPN, 115/16,5 kV, 25 MVA, YNd11



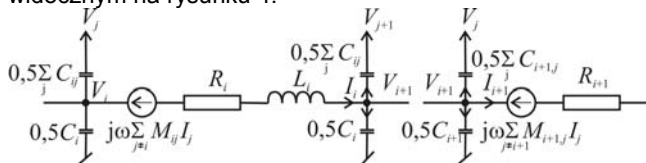
Rys.3. Odpowiedź częstotliwościowa uzwojeń transformatora RtdXP-125000/200, 230/120/15,75 kV, 160 MVA, YNa

W pracy przedstawiono wyjaśnienie przyczyny powstawania tego rezonansu oraz sposób jego modelowania. Wykonane przez autora prace kontrolowane deformacje uzwojeń kilku transformatorów pokazały, że nie mają one wpływu na położenie i kształt tego rezonansu [2,

3]. Jest więc on do celów diagnostycznych nieprzydatny. Dotychczasowe algorytmy modelowania uzwojeń, przedstawione np. w pracach [4, 5], nie uwzględniały tego rezonansu, dlatego wymagają one uzupełnienia modelu i odpowiedniej modyfikacji algorytmu.

Model uzwojenia zawierający elementy skupione

Model uzwojenia został opisany w [1]. Każdy ze zwojów uzwojenia został w nim zastąpiony pojedynczym ogniwem widocznym na rysunku 4.



Rys.4. Pojedyncze ogniwo odpowiadające jednemu zwojowi

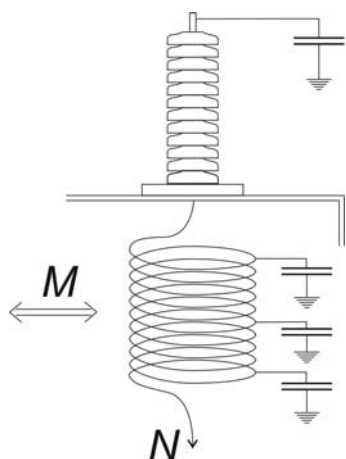
Zastosowane ogniwo zawiera rezystancję, indukcyjność i pojemność własną zwoju, jak również indukcyjności wzajemne oraz pojemności względem wszystkich pozostałych zwojów. Przy rozwiązywaniu powstałej w ten sposób sieci nie jest używany symulator obwodowy, jak MicroCAP lub SPICE, lecz równania opisujące tę sieć są rozwiązywane bezpośrednio:

$$(1) \quad \begin{aligned} I_i \cdot (R_i + j\omega L_i) &= V_i - V_{i+1} - j\omega \sum_{j \neq i} M_{ij} I_j, \\ V_i - V_{i+1} &= I_i \cdot R_i + j\omega \sum_j M_{ij} I_j. \end{aligned}$$

Oznaczenia równań (1) odpowiadają rysunkowi 4.

Przyczyna występowania rezonansu przy niskiej częstotliwości

Hipoteza autorów zakłada, że przyczyną zaistnienia tego rezonansu leży poza badanym uzwojeniem. W przypadku badania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia niskiego napięcia, zdaniem autorów rezonans ten powstaje w uzwojeniu wysokonapięciowym, które podczas pomiaru FRA pozostaje otwarte. Dotyczy to pomiarów w standardowej konfiguracji pomiędzy końcami uzwojenia (*end-to-end open*). Jeśli uzwojenie to zostało połączone w gwiazdę, jest ono jedynie dołączone do przepustów, jak pokazano na rysunku 5.



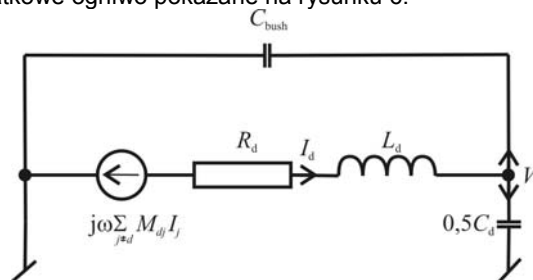
Rys.5. Uzwojenie wysokonapięciowe sprzężone indukcyjnie z badanym uzwojeniem niskim, wraz z pojemnościami własnymi i pojemnościami przepustów

Ponieważ częstotliwość analizowanego rezonansu wynosi około 1 kHz, jest to wartość, przy której współczynnik sprzężenia magnetycznego między uzwojeniami jest jeszcze bliski jedności. Można

zaobserwować, że kształt omawianego rezonansu zależy od tego, czy badane jest uzwojenie na kolumnie środkowej, czy na kolumnach bocznych. Przy badaniu uzwojenia na kolumnie bocznej występuje widoczne na rysunkach 1-3 „rozdwojenie” rezonansu, spowodowane niesymetrycznym układem niemierzonych uzwojeń na dwóch pozostałych kolumnach rdzenia.

Dodatkowe ogniwo w modelu

Z punktu widzenia mierzonego uzwojenia niskiego napięcia, uzwojenie górnego napięcia transformatora stanowi jeden element o skupionej indukcyjności i pojemności. W związku z tym model uzupełniony został o dodatkowe ogniwo pokazane na rysunku 6.



Rys.6. Ogniwo modelujące uzwojenie wysokonapięciowe wraz ze wszystkimi indukcyjnościami wzajemnymi oraz pojemnościami własnymi

Dodatkowe ogniwo zawiera model uzwojenia pierwotnego sprowadzony do pojedynczego zwoju. Parametry R i L tego zwoju są wyznaczane analogicznie, jak parametry zwojów uzwojenia niskiego napięcia. Pojemność przepustu C_{bush} wraz z pojemnością własną uzwojenia C_d tworzy wspólną pojemność doziemną, w omawianym przypadku przyjętą na poziomie 200 pF. Pojemność ta została następnie sprowadzona na stronę wtórną oraz do jednego zwoju dając dla transformatora o przekładni 15/0,4 i dla uzwojenia wtórnego o 24 zwojach wartość pojemności:

$$200 \text{ pF} \cdot (15000/400)^2 \cdot 24^2 = 162 \text{ }\mu\text{F}.$$

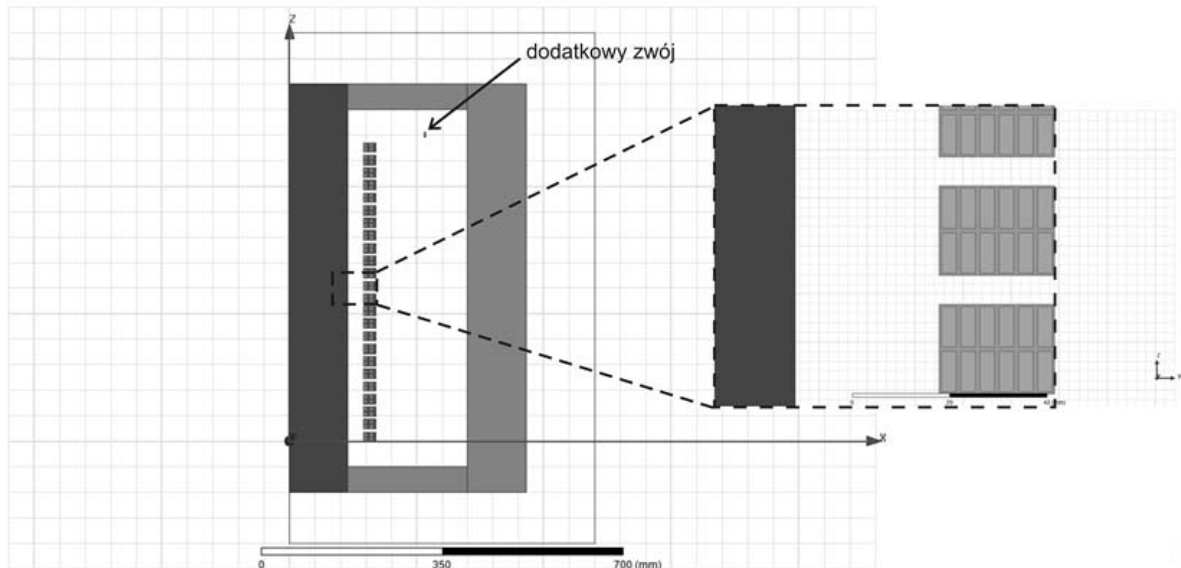
Do równań (1) dla gałęzi dodatkowej dochodzą następujące równania napięciowe i prądowe:

$$(2) \quad \begin{aligned} -V_d &= I_d \cdot R_d + j\omega \sum_j M_{dj} I_j \\ I_d &= j\omega (C_{bush} + 0,5 \cdot C_d) V_d. \end{aligned}$$

Model połowy uzwojenia

Parametry R , L , C uzwojenia są wyznaczane za pomocą połowego modelu uzwojenia. Analiza tego modelu odbywa się metodą elementów skończonych z użyciem pakietu ANSYS Maxwell. Za jego pomocą wyznaczane są parametry własne pojedynczych zwojów, jak też wszystkie indukcyjności i pojemności wzajemne pomiędzy nimi. Ze względu na konieczność modelowania pojedynczych zwojów możliwe jest użycie jedynie modelu o symetrii kołowo-walcowej 2D. Zbudowanie modelu trójwymiarowego przekracza możliwości dzisiejszego sprzętu obliczeniowego. Obliczenia 2D przy użyciu opisanego modelu zajmowały na serwerze z procesorem XEON 3 GHz około 80 godzin dla pojedynczej częstotliwości. Większość czasu obliczeniowego zabierało wyznaczanie macierzy indukcyjności wzajemnych w uzwojeniu.

Model zawiera uzwojenie składające się z 24 cewek po 12 równoległych zwojów, co przedstawiono na rysunku 7. Obok zamieszczono powiększenie wycinka uzwojenia z widoczną izolacją międzyzwojową. U góry zaznaczono dodatkowy zwój przewidziany do modelowania oddziaływania uzwojenia pierwotnego.



Rys.7. Model połowy uzwojenia i rdzenia w układzie kołowo-walcowym

Wyznaczanie pojemności odbywa się przez wyznaczenie energii pola elektrostatycznego opisanego równaniem

$$(3) \quad \nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \Phi(r, z)) = -\rho,$$

gdzie Φ jest potencjałem skalarnym pola indukowanego przez ładunek ρ , a ϵ_0 oraz ϵ_r są przenikalnościami próżni i przenikalnością względną. Wyznaczenie pojemności wzajemnych odbywa się na podstawie energii zgromadzonej w obszarze:

$$(4) \quad C_{ij} = \frac{2W_{ij}}{V^2} = \int_{\Omega} \mathbf{D}_i \cdot \mathbf{E}_j d\Omega, \quad \text{gdzie: } W_{ij} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mathbf{D}_i \cdot \mathbf{E}_j d\Omega.$$

Do wyznaczenia indukcyjności wzajemnych oraz rezystancji służy model pola elektromagnetycznego opisywanego równaniem

$$(5) \quad \nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) + j\omega \gamma \mathbf{A} = \mathbf{J}_s,$$

w którym \mathbf{A} oznacza wektorowy potencjał magnetyczny, w analizowanym przypadku posiadający jedną składową, γ konduktywność obszaru przewodzącego, ω pulsację prądu zasilającego, oraz \mathbf{J}_s jego gęstość w uzwojeniach. Uwzględniono efekt naskórkowości i zbliżenia przewodów uzwojenia.

Indukcyjności są wyznaczone z energii zgromadzonej w polu elektromagnetycznym

$$(6) \quad L_{ij} = \frac{4W_{AV}}{I_{Max}^2} = \int \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{H}_j d\Omega, \quad \text{gdzie: } W_{AV} = \frac{1}{4} \int \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{H}_j^* dV.$$

W celu wyznaczenia rezystancji przewodów posłużono się mocą czynną wydzielaną przez prąd o gęstości \mathbf{J} :

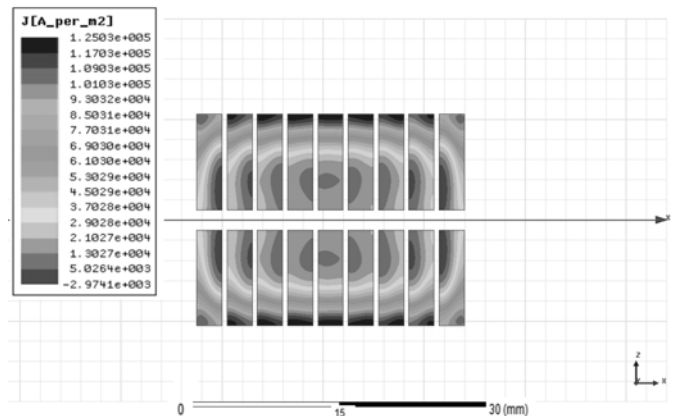
$$(7) \quad R = \frac{2P}{I_{Max}^2} = \frac{\int \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* d\Omega}{\gamma I_{Max}^2} = \frac{\int \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* d\Omega}{\gamma},$$

gdzie: $P = \frac{1}{2} \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* d\Omega.$

Na granicy obszaru zdyskretyzowanego elementami skończonymi posłużono się techniką „balooningu”, eliminując w ten sposób w znacznej mierze błąd zbyt bliskiego obcięcia obszaru.

Ze względu na szeroki zakres częstotliwości posłużono się dużą liczbą elementów skończonych trójkątnych, sięgającą 200 tys.

Na rysunku 8 pokazano rozkład gęstości prądu w wycinku badanego uzwojenia przy częstotliwości prądu zasilającego $f = 1\text{kHz}$. Widoczny jest efekt wypierania prądu, jak też efekt zbliżenia przewodów.



Rys.8. Rozkład gęstości prądu uzyskany na wycinku uzwojenia

Modelowanie rdzenia

Modelowanie zachowania się rdzenia przeprowadzono używając zespolonego współczynnika przenikalności magnetycznej μ [6, 7]. Zakładając jednowymiarowe wnikanie pola do laminowanego ferromagnetyka o grubości $2L$ otrzymuje się rozkład pola opisany równaniem [8]:

$$(8) \quad H_z(x) = H_0 \frac{\cosh(k \cdot x)}{\cosh(k \cdot L)},$$

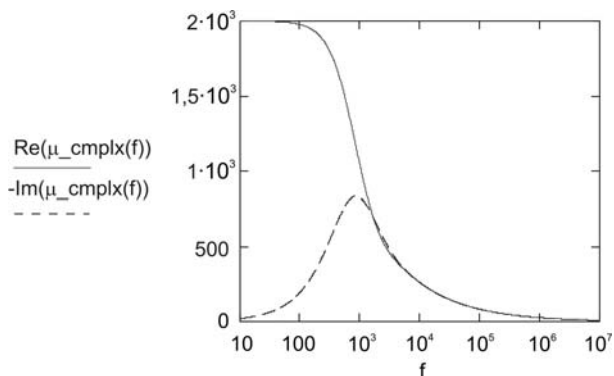
gdzie: $k = \frac{1+j}{\delta}$ oraz

głębokość wnikania pola $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}.$

Wprowadzono zespolony współczynnik przenikalności magnetycznej μ :

$$(9) \quad \begin{aligned} \bar{\mu} &= \frac{\bar{B}}{H_0} = \frac{I}{H_0 \cdot 2L} \int_{-L}^{+L} \mu \cdot H_z dx = \\ &= \mu_r \mu_0 \frac{\tanh(k \cdot L)}{k \cdot L} = \mu_0 \cdot (\mu' - j\mu'') \end{aligned}$$

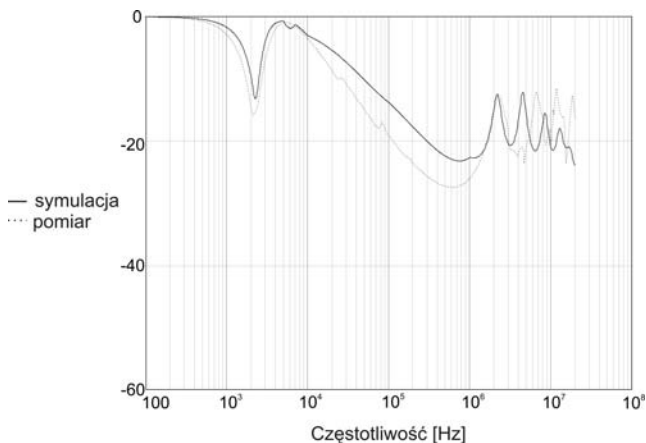
Wartości części rzeczywistej i urojonej μ dla badanego rdzenia pokazano na rysunku 9. Zostały one użyte w modelu polowym uzwojenia.



Rys.9. Zespolona przenikalność magnetyczna badanego rdzenia, jako funkcja częstotliwości

Wyniki symulacji

Analizę polową przeprowadzono dla częstotliwości zmieniających się w zakresie od 100Hz do 10MHz. Wartości indukcyjności i rezystancji leżące pomiędzy punktami analizy otrzymano drogą interpolacji liniowej. Wyznaczenie pojemności odbywało się dla modelu elektrostatycznego i założono, że pojemności występujące w uzwojeniu nie zależą od częstotliwości. Częstotliwości, dla których były wykonywane symulacje obwodowe zostały importowane z danych miernika FRA. Wynik porównania symulowanej charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia z charakterystyką uzyskaną z pomiaru dla transformatora TONa800/15 przedstawiono na rysunku 10.



Rys.10. Porównanie symulowanej charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej ze zmierzoną na transformatorze TONa800/15.

Symulacja komputerowa wykazała, że w zakresie częstotliwości do 5 kHz o rezystancji i indukcyjności uzwojenia decydują parametry rdzenia: jego przenikalność magnetyczna i stratność. Przy częstotliwościach powyżej 100 kHz rdzeń traci znaczenie. Wartości indukcyjności uzwojeń zmniejszają się znacznie, a o rezystancji uzwojenia nie decydują już straty w rdzeniu, a naskórkowość i efekt zbliżenia przewodów. Obrazy pola pokazują, że wtedy pole praktycznie nie wnika do rdzenia.

Podsumowanie

W artykule udowodniono, że pierwszy rezonans na charakterystyce odpowiedzi częstotliwościowej dowolnego uzwojenia transformatora pochodzi od innego uzwojenia wysokiego napięcia. To niepodłączone uzwojenie jest uziemione przez pojemność izolatorów przepustowych, jak też własne pojemności uzwojenia do kadzi. Uzyskanie tego rezonansu na symulowanej charakterystyce uzwojenia niskiego napięcia jest możliwe, jeśli do modelu wprowadzi się dodatkowy zwój sprzężony magnetycznie, zastępujący uzwojenie wysokiego napięcia. W praktyce położenie tego rezonansu w skali częstotliwościowej nie zależy od uzwojenia, na którym realizowany jest pomiar odpowiedzi częstotliwościowej (dla standardowej konfiguracji *end-to-end*), co można zaobserwować w przypadku pomiarów na obiektach rzeczywistych.

LITERATURA

- [1] Gawrylczyk K.M., Banaszak Sz.: *Modeling Of Frequency Response of Transformer Winding with Axial Deformations*, Archives of Electrical Engineering, vol. 63, nr 1, 2014, 5-17,
- [2] Banaszak Sz., Szrot M.: *Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora w warunkach kontrolowanej deformacji*, IX Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW-2008, Będlewo, czerwiec 2008, Przegląd Elektrotechniczny 10/2008, 128-131
- [3] Banaszak Sz.: *Wybrane czynniki wpływające na odpowiedź częstotliwościową autotransformatora energetycznego*, Miesięcznik Naukowo-Techniczny, Pomiary Automatyka Kontrola, Transformatory w Eksploatacji, Nr 4/2011 r., Vol.57, ISSN 0032-4140, 364-367
- [4] de Gerssem H., Henze O., Weiland T., Binder A.: *Simulation of Wave Propagation Effects in Machine Windings*, COMPEL 29(1), 2010, 23-38
- [5] Wang H., Butler K.L.: *Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in Distribution Transformers*, IEEE Trans. on Power Delivery 16(3), 2001, 422-427
- [6] Bjerkan E.: *High Frequency Modeling of Power Transformers. Stresses and Diagnostics*, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2005
- [7] Bjerkan E., Hoidalén H.K., Moreau O.: *Importance of a Proper Iron Core Representation in High Frequency Power Transformer Models*, Proc. of the XIVth Int. Symp. on High Voltage Engineering, Beijing, China, August 25-29, 2005.
- [8] Lammeraner J., Staffl M.: *Eddy Currents*, Iliffe Books Ltd. 1966

Autorzy: dr inż. Szymon Banaszak, E-mail: Szymon.Banaszak@zut.edu.pl; prof. dr hab. inż. Konstanty M. Gawrylczyk, E-mail: Konstanty.Gawrylczyk@zut.edu.pl
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-310 Szczecin