

doi:10.15199/48.2024.11.50

# Modelowanie części aktywnej transformatora energetycznego na potrzeby interpretacji wyników FRA

**Streszczenie.** W artykule przedstawiony został sposób modelowania części aktywnej transformatora energetycznego, który może zostać wykorzystany do poprawy efektywności interpretacji wyników FRA. Metoda przedstawiona w artykule wykorzystuje modele polowo-obwodowe, które w pełni odwzorowują warunki występujące podczas pomiaru metodą FRA. Działanie zaproponowanego modelu zostało przetestowane na rzeczywistym obiekcie. Wyniki symulacji porównano z wynikami pomiarów przeprowadzonych na uzwojeniu transformatora o mocy 25 MVA.

**Abstract.** The article presents a method of modeling the active part of a power transformer, aimed at improving the interpretation of FRA results. The proposed method utilizes field-circuit models that accurately replicate the conditions during FRA measurements. The functionality of the model was validated using a real transformer. Simulation results were compared with measurements carried out on the winding of a 25 MVA transformer. (*Modeling of the active part of a power transformer for the interpretation of FRA results*).

**Słowa kluczowe:** Analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA), modelowanie, uzwojenia transformatora.

**Keywords:** Frequency Response Analysis (FRA), modeling, transformer windings.

## Wstęp

Strategiczne znaczenie transformatorów w systemie elektroenergetycznym wymusza konieczność odpowiedniego monitoringu ich stanu technicznego. W trakcie swojej pracy transformatory energetyczne są narażone na liczne obciążenia termiczne, elektryczne oraz mechaniczne, które mogą prowadzić do powstania różnego rodzaju uszkodzeń. Uszkodzenia te, szczególnie w przypadku starzejącej się populacji transformatorów, powodują zmniejszenie niezawodności pracy i ciągłości działania jednostek. W celu wyeliminowania możliwych awarii transformatory energetyczne eksploatuje się realizując odpowiednio dobrane strategie. Obecnie najczęściej jest to połączenie strategii prewencyjnej na podstawie badań okresowych oraz strategii eksploatacji dla zapewnienia niezawodności. Monitoring stanu technicznego przeprowadza się w oparciu o szeroki wachlarz badań diagnostycznych, zarówno *offline* jak i *online* [1].

Metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA – *Frequency Response Analysis*) jest metodą, która pozwala ocenić stan mechaniczny transformatora, szczególnie uszkodzenia i deformacje uzwojeń oraz rdzenia. Pomiar FRA opiera się na założeniu, że istnieje zależność między kształtem geometrycznym badanego obiektu, a kształtem jego funkcji przejścia. Z geometrii badanego uzwojenia wynikają wartości pojemności, indukcyjności, rezystancji oraz sprzężeń między poszczególnymi zwojami oraz całym badanym uzwojeniem i innymi elementami konstrukcji. Innymi słowy, badany układ można traktować jako złożony obwód *RLC*, w którym zmiany wartości parametrów są widoczne na jego odpowiedzi częstotliwościowej. Odpowiedź częstotliwościowa jest rejestrowana jako amplituda tłumienia sygnału pomiarowego w szerokim zakresie częstotliwości. Każda zmiana wartości parametrów *RLC* wywołana przez zmianę geometrii uzwojenia, powoduje zmianę częstotliwości i amplitudy lokalnych rezonansów widocznych na zarejestrowanej charakterystyce FRA. Porównując ze sobą dwa przebiegi można określić rodzaj oraz potencjalną lokalizację uszkodzeń badanej części aktywnej.

Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej jest jednym z narzędzi mających wspomóc analizę i ocenę wyników FRA. Celem modelowania odpowiedzi częstotliwościowej jest gromadzenie różnych typów deformacji oraz dokładne określenie ich wpływu i skali na kształt krzywej FRA.

Poszerzenie wiedzy na temat zależności między zmianami geometrii badanych uzwojeń a kształtem odpowiedzi częstotliwościowej pozwoliłoby na poprawę efektywności oraz automatyzację procesu oceny wyników pomiarów.

Obecnie do modelowania na potrzeby FRA najczęściej wykorzystuje się modele obwodowe o parametrach skupionych, w których parametry *RLC* uzwojeń są obliczane przy pomocy metod statystycznych lub numerycznych [2]. Należy zauważyć, że żadne z obecnie dostępnych rozwiązań nie stanowi samodzielnego, skutecznego narzędzia do analizy wyników FRA. Problemem modeli przedstawianych w wielu publikacjach jest brak weryfikacji wyników na rzeczywistych transformatorach mocy. W większości artykułów naukowcy bazują na modelach laboratoryjnych uzwojeń o wymiarach i mocy zbliżonych do uzwojeń transformatorów rozdzielczych lub weryfikują swoje rozwiązania na pojedynczych rzeczywistych przypadkach. Nie dają to kompleksowej wiedzy na temat zachowania się danego narzędzia w praktyce przemysłowej. Należy pamiętać, że metoda FRA jest metodą, którą w praktyce stosuje się głównie do diagnostyki transformatorów z grupy I-szej i II-giej, których uzwojenia o różnej, skomplikowanej konstrukcji składają się często z kilku tysięcy zwojów.

W artykule przedstawiony został sposób modelowania części aktywnej transformatora, który pozwala na wyznaczenie odpowiedzi częstotliwościowej jego uzwojeń przy pomocy modelu polowo-obwodowego. Przedstawione podejście pozwala na stworzenie prostego modelu polowego 2D, który dostarcza dokładnych parametrów *RLC* uzwojeń transformatora. Uproszczenie modelu uzwojenia przy jednoczesnym zachowaniu jego dokładności, ma kluczowe znaczenie przy symulacjach odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń wielowarstwowych o liczbie zwojów sięgającej kilku tysięcy. Zaproponowany algorytm obwodowy pozwala na uwzględnienie oddziaływania między wszystkimi zwojami badanego uzwojenia. Poprawność działania przedstawionego modelu polowo-obwodowego została przetestowana na rzeczywistym obiekcie, którym był transformator o mocy 25 MVA, 120/6,3 kV.

Przeprowadzone badania wpisują się w obszar zwiększania skuteczności oceny wyników pomiarów diagnostycznych wykonywanych przy pomocy metody FRA.

## Model polowy

Modelowanie w szerokim zakresie częstotliwości wymaga uwzględnienia efektu naskórkowości, który ma wpływ na wszystkie przewodzące części modelowanego transformatora, także na rdzeń wykonany z materiału ferromagnetycznego. W symulacji MES uwzględnienie prądów wirowych oznacza konieczność bardzo dokładnej dyskretyzacji modelu, która w wielu przypadkach uniemożliwia przeprowadzenie efektywnej symulacji. W opisywanym modelu polowym symulacja zachowania się laminowanego rdzenia podczas pomiaru w szerokim zakresie częstotliwości jest realizowana poprzez użycie zarówno zastępczych wartości przenikalności magnetycznej jak i konduktywności materiału, które pozwalają na przyjęcie pewnych przybliżeń upraszczających obliczenia polowe. Szczegółowy opis wykorzystanych zależności przedstawiono w [3].

Podczas pomiaru rdzeń jest wzbudzany w niewielkim stopniu, a co za tym idzie, wartość początkowa przenikalności magnetycznej rdzenia jest dużo niższa od wartości znamionowej przenikalności magnetycznej blachy, z którego wykonany jest rdzeń i zazwyczaj wynosi około kilkuset.

Ogólnie przyjęte podejście do tej kwestii, zaprezentowane przez Moreau'a i in. [4] zakłada użycie zespolonej przenikalności magnetycznej w celu odwzorowania wpływu prądów wirowych na przewodnik. Idea zakłada zastąpienie przewodzącego laminowanego rdzenia przez nieprzewodzący lity rdzeń, w którym właściwości rdzenia oraz straty są reprezentowane przez zastępczą przenikalność zespoloną obliczoną w sposób analityczny. Przenikalność zespolona arkusza blachy o grubości  $2d$  wynosi:

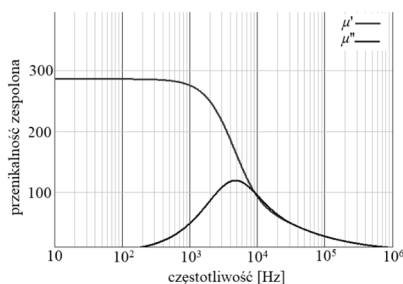
$$(1) \quad \underline{\mu} = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{\tanh kd}{kd} = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{\sinh kd}{kd \cdot \cos kd} = \mu_0 (\mu' + j\mu''),$$

a po rozdzieleniu na część rzeczywistą i urojoną:

$$(2) \quad \mu' = \frac{\operatorname{Re}(\underline{\mu})}{\mu_0} = \frac{\mu_r \delta}{2d} \left( \frac{\sinh\left(\frac{2d}{\delta}\right) + \sin\left(\frac{2d}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2d}{\delta}\right) + \cos\left(\frac{2d}{\delta}\right)} \right),$$

$$(3) \quad \mu'' = \frac{-\operatorname{Im}(\underline{\mu})}{\mu_0} = \frac{\mu_r \delta}{2d} \left( \frac{\sinh\left(\frac{2d}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2d}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2d}{\delta}\right) + \cos\left(\frac{2d}{\delta}\right)} \right).$$

Część rzeczywista przenikalności reprezentuje zdolność materiału rdzenia do przewodzenia strumienia magnetycznego, natomiast część urojona odzwierciedla straty powstające wskutek cyrkulacji prądów wirowych w laminowanym rdzeniu. Charakterystyka zastępczej przenikalności zespolonej dla badanego transformatora została przedstawiona na rysunku 1.



Rys.1. Zastępcza przenikalność zespolona materiału rdzenia transformatora 25 MVA, 120/6,3 kV

Konduktywność zastępcza rdzenia laminowanego jest wyznaczana przy pomocy energii zgromadzonej w polu elektromagnetycznym rozważanego modelu. Zakłada się, że energia modelu z rdzeniem laminowanym o konduktywności  $\gamma$  jest równa energii modelu z rdzeniem litym o odpowiednio zmienionej konduktywności zastępczej  $\gamma_e$  [5]. To założenie prowadzi do bardzo prostej zależności:

$$(4) \quad \gamma_e = \frac{\gamma}{n^2},$$

gdzie  $n$  oznacza liczbę blach w rdzeniu.

W proponowanym rozwiązaniu typowy model 3D zastąpiony jest modelem 2D o odpowiednio zmienionych parametrach w celu zmniejszenia czasochłonności analizy numerycznej. Zmniejszenie czasochłonności analizy polowej może znacząco wpłynąć na modelowanie odkształceń mechanicznych uzwojeń za pomocą modeli o parametrach skupionych. Różnice między modelami 2D i 3D wynikają z różnych układów współrzędnych, w których są one rozpatrywane. Model 3D rozważany w kartezjańskim układzie współrzędnych w pełni odpowiada geometrii modelu fizycznego, natomiast model 2D zawiera znacznie więcej materiału ferromagnetycznego ze względu na zastosowanie symetrii cylindrycznej. Różne ilości materiału magnetycznego w modelach 2D i 3D oznaczają różne wartości reluktancji w obwodach magnetycznych, a co za tym idzie, różne wartości strumienia magnetycznego. W opisywanym modelu założono, że wartości całkowitej reluktancji magnetycznej modeli 2D i 3D powinny być takie same. W celu zmniejszenia reluktancji modelu 2D skorygowano przenikalność magnetyczną względną modelu 2D. Zastosowana koncepcja odpowiada badaniom przedstawionym w [6].

Analiza numeryczna pola elektromagnetycznego przeprowadzana jest w oprogramowaniu ANSYS Maxwell. Analiza została przeprowadzona dla kilku charakterystycznych częstotliwości, natomiast wartości parametrów  $RLC$  dla pozostałych częstotliwości z badanego zakresu zostały wyznaczone przy pomocy interpolacji liniowej.

Pojemności wyznaczona została na podstawie energii pola elektrostatycznego modelu:

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

gdzie:  $W_{ij}$  – energia pola elektrycznego związana z liniami strumienia łączącego ładunek przewodnika  $i$  z ładunkiem przewodnika  $j$ ,  $\mathbf{D}_i$  – wektor indukcji elektrycznej,  $\mathbf{E}_j$  – wektor natężenia pola elektrycznego,  $V$  – napięcie.

Indukcyjność cewek została obliczona na podstawie energii pola elektromagnetycznego:

$$(6) \quad W_{AV} = \frac{1}{4} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}^* d\Omega, \quad L = \frac{4W_{AV}}{I_{\max}^2} = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}^* d\Omega,$$

gdzie:  $W_{AV}$  – średnia energia pola magnetycznego,  $L$  – indukcyjność,  $\mathbf{B}$  – wektor indukcji magnetycznej,  $\mathbf{H}^*$  – sprzężenie wektora natężenia pola magnetycznego,  $I_{\max}$  – amplituda natężenia prądu.

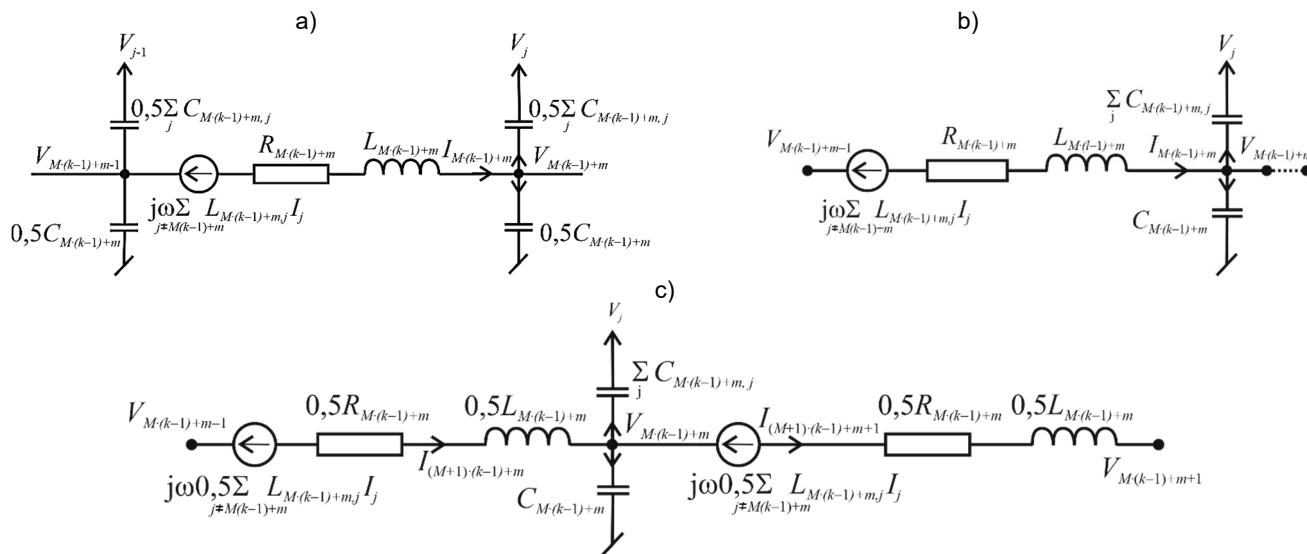
## Algorytm obwodowy

Odpowiedź częstotliwościowa analizowanego uzwojenia jest wyznaczana na podstawie modeli obwodowych o parametrach skupionych. W prezentowanych modelach obwodowych pojedynczy człon  $RLC$  odwzorowuje pojedynczy zwój. Dodatkowo, oddziaływanie pomiędzy poszczególnymi zwojami jest reprezentowane przez

indukcyjności wzajemne oraz dodatkowe pojemności. Wygenerowane z modelu MES parametry elektryczne są umieszczane w układzie równań, który odwzorowuje zależności prądowo-napięciowe w węzłach modelu obwodowego. Na podstawie rozwiązania tego układu wyznaczane są charakterystyki częstotliwościowe badanych uzwojeń.

Model obwodowy został przygotowany w trzech konfiguracjach –  $\Pi$ ,  $\Gamma$  oraz T. Każdy model obwodowy uwzględnia możliwość istnienia połączeń równoległych między cewkami. Zasadniczo, konfiguracje te różnią się między sobą rozmieszczeniem elementów  $R$ ,  $L$ ,  $C$  w pojedynczym ogniwie, które odpowiada pojedynczemu zwojowi. Przy połączeniu szeregowo-równoległym ogniwo przekłada się to na różny charakter wejść i wyjść

i wyjście pojemnościowe, model T – wejście i wyjście indukcyjne, natomiast model  $\Gamma$  – wejście indukcyjne a wyjście pojemnościowe. Na rysunku 2 przedstawiono modele pojedynczego zwoju w trzech konfiguracjach. Przedstawione zwoje o numerze  $M \cdot (k-1) + m$  zawierają indukcyjność własną  $L_{M \cdot (k-1) + m}$ , pojemność własną  $C_{M \cdot (k-1) + m}$  oraz rezystancję własną  $R_{M \cdot (k-1) + m}$ , a także indukcyjność wzajemną  $L_{M \cdot (k-1) + m, j}$  oraz pojemność wzajemną  $C_{M \cdot (k-1) + m, j}$  między zwojami  $M \cdot (k-1) + m$  oraz  $j$ . W przypadku połączenia szeregowo-równoległego liczba zwojów wynosi  $N = M \cdot K$ , gdzie  $M$  to liczba zwojów w szeregu, a  $K$  to liczba gałęzi równoległych. Szczegółowy opis takiego modelu w konfiguracji  $\Pi$  można znaleźć w [7]. Dla pozostałych dwóch konfiguracji połączenia szeregowo-równoległe zostały zrealizowane analogicznie.



Rys.2. Model pojedynczego zwoju: a) o strukturze  $\Pi$ , b) o strukturze  $\Gamma$ , c) o strukturze T

### Modelowanie transformatora 25 MVA

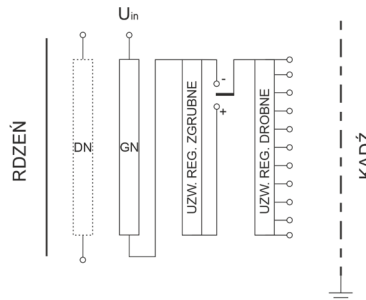
Badanym obiektem był transformator energetyczny o mocy 25 MVA oraz napięciach znamionowych 120/6,3 kV. Szczegółowe dane badanej jednostki znajdują się w tab. 1.

Tabela 1. Dane znamionowe transformatora energetycznego 25 MVA, 120/6,3 kV

Typ transformatora	olejowy
Rok produkcji	1977
Częstotliwość znamionowa	50 Hz
Liczba faz	3
Rodzaj pracy	C
Układ połączeń	Yd11
Moc znamionowa	25 000 kVA
Napięcie znamionowe – uzwojenie GN	120 ± 14,2 % (± 12 st.) kV
Napięcie znamionowe – uzwojenie DN	6,3 kV
Prąd znamionowy – uzwojenie GN	120,2 A
Prąd znamionowy – uzwojenie DN	2290 A
Napięcie zwarcia	12 %
Typ PPZ	regulacja zgrubna-drobna
Wymiar części aktywnej wraz z PPZ [mm]	3110 x 1570 x 4358

Pomiar FRA został wykonany dla uzwojenia GN przy użyciu urządzenia pomiarowego Omicron FRAnalyzer w konfiguracji pomiarowej *end-to-end open* w zakresie

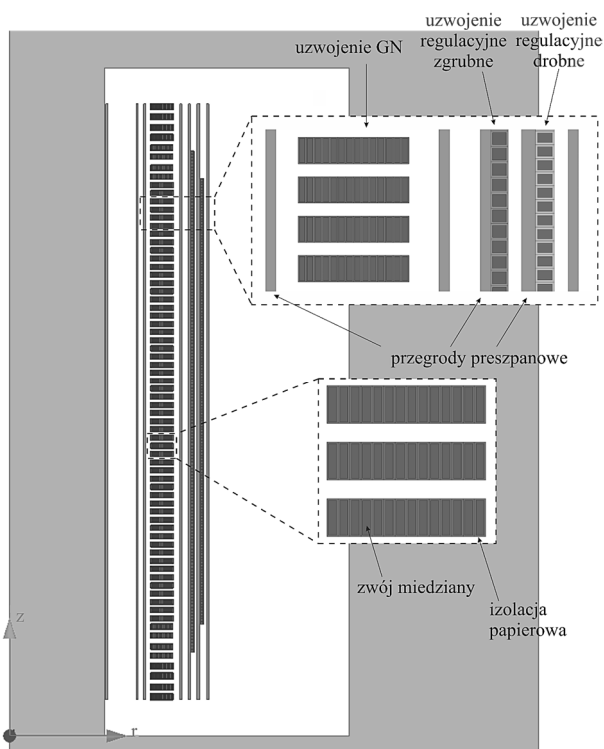
częstotliwości od 20 Hz do 10 MHz. Podczas pomiaru przełącznik zaczepek ustawiony był w pozycji maksymalnej dodatniej, tzn. całe uzwojenie regulacyjne było dołączone do obwodu pomiarowego. Oznacza to, że w obwodzie pomiarowym aktywnych było 1260 zwojów. Schemat połączenia badanego uzwojenia z uzwojeniem regulacyjnym został przedstawiony na rysunku 3.



Rys.3. Schemat połączenia uzwojenia GN z uzwojeniem regulacyjnym

Na podstawie danych konstrukcyjnych badanego transformatora opracowany został model symulacyjny uzwojenia GN z dołączonym uzwojeniem regulacyjnym. Rzeczywiste uzwojenie szeregowo zastąpione zostało zestawem niezależnych pętli z prądem, których pole analizowane było w cylindrycznym układzie 2D. Strukturę modelu przedstawia rysunek 4. Model składa się z rdzenia i uzwojeń w izolacji papierowo-olejowej, dodatkowo

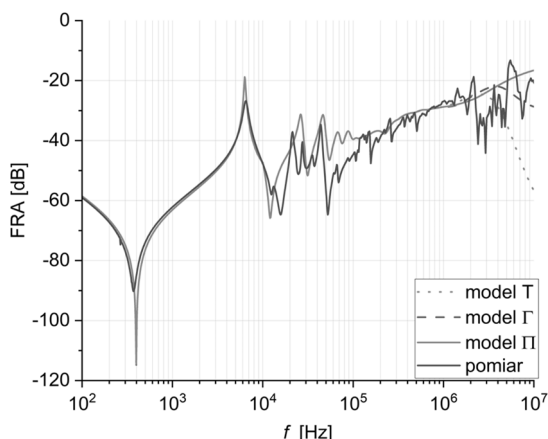
uwzględnione zostały przegrody preszpanowe między uzwojeniami. Model został przygotowany z uwzględnieniem zasad opisanych we wcześniejszych paragrafach, które pozwalają na odwzorowanie w analizie warunków pomiarów FRA.



Rys.4. Model uzwojenia GN wraz z uzwojeniem regulacyjnym transformatora 25 MVA, 120/6,3 kV

Dla każdego z 1260 zwojów wyznaczone zostały parametry własne  $RLC$  oraz indukcyjności i pojemności wzajemne. Połączenie niezależnych pętli w odpowiednio połączone uzwojenie następuje w algorytmie obliczeń obwodowych, dla którego danymi wejściowymi są obliczone numerycznie parametry elektryczne własne i wzajemne. W algorytmie obwodowym uwzględniono inny kierunek nawinięcia uzwojeń regulacyjnych.

W wyniku obliczeń algorytmami obwodowymi wyznaczono charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej analizowanego uzwojenia i porównano je z przebiegami odpowiedzi częstotliwościowej uzyskanymi z pomiaru FRA. Porównanie uzyskanych przebiegów przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Porównanie przebiegów FRA wyznaczonych przy pomocy symulacji modelami polowo-obwodowymi  $\Pi$ ,  $\Gamma$  oraz  $T$  i wyniku pomiaru na rzeczywistym transformatorze 25 MVA

Przydatność modeli  $\Pi$ ,  $\Gamma$  oraz  $T$  przy modelowaniu tego transformatora okazała się zbliżona. Wyniki symulacji różnią się względem pomiaru FRA w zakresie częstotliwości od 10 kHz do 100 kHz. W tym zakresie oraz przy jeszcze wyższych częstotliwościach o przebiegu charakterystyki decydują pojemności, głównie międzyzwojowe. Wyznaczanie pojemności w opisanych w tej pracy modelach polowych odbywa się przy użyciu obliczeń elektrostatycznych. W obliczeniach tych cała powierzchnia przewodnika jest ekwipotencjalna. Przy silnym wypieraniu prądu dla wysokich częstotliwości prąd płynie jedynie w narożnikach przewodów, co wpływa między innymi na pojemności międzyzwojowe. Tego zjawiska nie można uwzględnić w wykorzystywanym oprogramowaniu MES. Odpowiednia modyfikacja modeli będzie przedmiotem przyszłych prac. Inną przyczyną rozbieżności między modelami a pomiarem może być nie uwzględnienie w modelu 2D przewodów prowadzących do przełącznika zaczeów, które leżą bardzo blisko uzwojenia regulacyjnego. Modelowanie ich wpływu byłoby możliwe bezpośrednio w algorytmie obwodowym po oszacowaniu pojemności tych przewodów względem uzwojenia.

Pierwszy i drugi rezonans widoczne na krzywej FRA mają nieco większą amplitudę w porównaniu do wyniku pomiaru. Wynika to ze zbyt dużej zamodelowanej dobroci obwodu w tym zakresie częstotliwości. W rzeczywistości oddziaływanie pomiędzy uzwojeniami ma bardziej rozproszony charakter. Na rysunku 5 można również zaobserwować duży spadek charakterystyki uzyskanej za pomocą modelu  $T$  oraz modelu  $\Gamma$  dla częstotliwości powyżej 2 MHz. W tym zakresie częstotliwości nie prowadzi się diagnostyki metodą FRA ze względu na silny wpływ wyprowadzeń i układu pomiarowego na mierzoną krzywą, dlatego kształt zamodelowanych krzywych powyżej 2 MHz nie ma znaczenia dla poprawności przeprowadzanych symulacji.

**Autorzy:** dr inż. Katarzyna Trela, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, E-mail: katarzyna.trela@zut.edu.pl.

#### LITERATURA

- [1] Lin L., Kim D., Abu-siada A., State-of-the-art review on asset management methodologies for oil-immersed power transformers, *Elect. Power Systems Research*, vol. 218 (2023)
- [2] Zhao, X.Z.; Yao, C.G.; Abu-Siada, A.; Liao, R.J. High Frequency Electric Circuit Modeling for Transformer Frequency Response Analysis Studies, *Inter. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 111 (2019), pp. 351–368
- [3] Gawrylczyk K. M., Trela K., Frequency response modeling of transformer windings utilizing the equivalent parameters of a laminated core, *Energies*, vol. 12 (2019), no. 12
- [4] Moreau O., Popiel L., Pages J. L., Proximity losses computation with a 2D complex permeability modelling, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34 (1998), no. 5.1, pp. 3612–3615
- [5] Wang J., Lin H., Huang Y., Sun X., A new formulation of anisotropic equivalent conductivity in laminations, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 47 (2011), no. 5, pp. 1378–1381
- [6] Bjerkan E., Hoidalén H. K., Moreau O., Importance of a Proper Iron Representation in High Frequency Power Transformer Models, w *Proc. of the XVth International Symposium on High Voltage Engineering*, August 25-29 2005, Beijing, China, 2005.
- [7] Banaszak S., Gawrylczyk K. M., Trela K., Frequency response modelling of transformer windings connected in parallel, *Energies*, vol. 16 (2020), no. 3