

## *Streszczenie*

Transformatory energetyczne są jednymi z najważniejszych elementów systemu energetycznego, ponieważ gwarantują stabilną dostawę energii do odbiorców. Jednocześnie transformatory stanowią najdroższy element w sieci energetycznej. Z tego powodu ich bezawaryjna praca jest kluczowa dla utrzymania bezpieczeństwa energetycznego i ma strategiczne znaczenie w zarządzaniu majątkiem sieciowym. W celu wyeliminowania jak największej liczby awarii dla jednostek o znaczeniu krytycznym prowadzona jest strategia eksploatacji oparta o okresowe badania stanu technicznego. Jedną z metod diagnostycznych, służącą do oceny stanu technicznego części aktywnej transformatora jest metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA – *Frequency Response Analysis*), która pozwala na określenie uszkodzeń mechanicznych uzwojenia, szczególnie jego deformacji i odkształceń.

Tematyka rozprawy związana jest z modelowaniem odpowiedzi częstotliwościowej na potrzeby analizy pomiarów FRA. Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej jest jedną z metod wspomagających proces interpretacji wyników oraz jednym z kierunków rozwoju metody diagnostycznej FRA. Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej ma na celu gromadzenie wielu przypadków deformacji i dokładne określanie ich wpływu na kształt krzywej FRA. W związku z tym, w pracy została postawiona teza, iż możliwe jest stworzenie efektywnego algorytmu wyznaczającego odpowiedź częstotliwościową uzwojeń transformatora energetycznego na podstawie jego danych konstrukcyjnych, który pozwoliłby na usprawnienie procesu oceny stanu technicznego części aktywnej transformatora.

Zasadniczym celem badawczym tego opracowania było stworzenie i przetestowanie nowych algorytmów numerycznych, opartych na analizie pola elektromagnetycznego w transformatorze oraz na analizie modelu obwodowego uzwojenia, które pozwolą na zamodelowanie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia w szerokim zakresie częstotliwości.

W pracy przedstawiono model połowy części aktywnej transformatora w przestrzeni 2D, który usprawnia proces analizy MES pola elektromagnetycznego poprzez zastosowanie zastępczych parametrów fizycznych materiału rdzenia, co doprowadziło do ograniczenia rozmiaru siatki elementów skończonych w obszarze obliczeniowym. Opracowany model połowy uwzględnia oddziaływanie innych uzwojeń transformatora na badaną odpowiedź częstotliwościową. Ponadto podano ogólne warunki równoważności modeli 3D i 2D, które można zastosować do każdego rozpatrywanego przypadku. Zaprezentowany model połowy pozwala na wyznaczenie dokładnych parametrów *RLC* badanego uzwojenia transformatora.

Kolejnym etapem badań było opracowanie algorytmu obwodowego wyznaczania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia. Zaproponowano modele obwodowe o parametrach skupionych w trzech konfiguracjach  $\Pi$ ,  $\Gamma$  oraz T. W każdej z konfiguracji pojedyncze ogniwo *RLC* odwzorowuje pojedynczy zwój. Zaproponowane modele uwzględniają oddziaływanie pomiędzy wszystkimi zwojami, wpływ pozostałych uzwojeń na

modelowaną krzywą odpowiedzi częstotliwościowej oraz połączenia równoległe między zwojami.

Przeprowadzono szereg badań symulacyjnych w celu zweryfikowania działania zaproponowanego modelu polowego oraz algorytmów obliczeń obwodowych. Obiektami testowymi były zarówno uzwojenia powietrzne jak i na rdzeniu, o zwojach połączonych szeregowo oraz w sposób równoległy. Głównym obiektem weryfikującym efektywność zaproponowanego algorytmu było uzwojenie transformatora energetycznego o mocy 25 MVA oraz napięciach 120/6,3 kV. Analiza otrzymanych wyników symulacyjnych poprzez porównanie ich z wynikami pomiarów na rzeczywistych obiektach testowych wykazała, że zaproponowane rozwiązanie umożliwia wyznaczenie odpowiedzi częstotliwościowej z zadawalającą dokładnością.