

prof. dr hab. inż. Sebastian Borucki
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej
ul. Prószkowska 76, budynek 2
45-758 Opole

Opole, 27-07-2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Treli pn. „Algorytm wyznaczania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora energetycznego”

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie – Pana dra hab. inż. Pawła Dworaka, prof. ZUT, zgodnie z uchwałą nr 11 z dnia 22 czerwca 2023 r.

Promotorem rozprawy jest Pan prof. dr hab. inż. Konstanty Marek Gawrylczyk.

1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy

W dobie powszechnej elektryfikacji i globalnego „uzależnienia się” społeczeństwa od nieprzerwanych dostaw energii elektrycznej, koniecznym stało się stałe podnoszenie niezawodności pracy poszczególnych urządzeń wchodzących w skład systemu elektroenergetycznego. Jednym ze strategicznych jego elementów są niewątpliwie transformatory energetyczne, których koszt inwestycyjny w stosunku do pozostałej wartości elementów infrastruktury sieciowej może wynosić nawet ok. 10 %. Awaryjne wyłączenie transformatora mocy może więc spowodować znaczne straty ekonomiczne, które w ekstremalnych warunkach mogą nawet przekroczyć kilkukrotnie wartość nowego urządzenia. Nagłe wyłączenie niewralgicznej jednostki może także spowodować chwilowe zachwianie bezpieczeństwa energetycznego regionu, które w niekorzystnych warunkach może przekształcić się w lokalny blackout.

W celu utrzymania ciągłości zasilania w energię elektryczną na odpowiednio wysokim poziomie od wielu lat wdrażane są liczne procedury techniczne, których zadaniem jest m.in. próba ograniczenia możliwości wystąpienia awarii katastrofalnych transformatorów. Ryzyko wystąpienia takich awarii może być ograniczone poprzez utrzymanie jednostek w dobrym stanie technicznym, a ten może być oceniony jedynie w oparciu o skuteczną i wiarygodną ich diagnostykę, która realizowana jest aktualnie w sposób okresowy lub w zależności od zdarzeń sieciowych, które wystąpiły na danym transformatorze i/lub w obrębie jego eksploatacji. Należy podkreślić, że na przełomie ostatnich lat nastąpił zdecydowany rozwój nowoczesnych metod pomiarowych umożliwiających efektywną ocenę stanu technicznego transformatorów.

a jedną z nich jest niewątpliwie metoda odpowiedzi częstotliwościowej FRA (ang. *Frequency Response Analysis*). Metoda ta jest już od wielu lat stosowana powszechnie do wykrywania odkształceń, przemieszczeń, czy zwarć występujących w uzwojeniach transformatora. Analiza przebiegów funkcji przenoszenia odpowiedzi napięciowej uzwojenia w zmiennym paśmie częstotliwości pozwala także na detekcję uszkodzeń obwodu magnetycznego, które spowodowane są najczęściej obecnością zwarć w poszczególnych pakietach rdzenia. Metoda FRA jest metodą porównawczą, w której w celu identyfikacji defektu uzwojenia i/lub rdzenia badanego transformatora koniecznym jest porównanie ze sobą co najmniej dwóch przebiegów – z pomiaru referencyjnego i pomiaru ocenianego. Następnie na podstawie identyfikacji różnic w korelowanych przebiegach możliwe jest określenie występowania ewentualnych defektów w części aktywnej diagnozowanej jednostki. Stwierdzić tutaj należy, że aktualnie problemem nie jest wykonanie pomiarów FRA na transformatorze, lecz poprawna interpretacja uzyskanych wyników, a w konsekwencji przedstawienie przez diagnostę wiarygodnej informacji o rzeczywistym stanie technicznym uzwojeń i rdzenia monitorowanego urządzenia. Jak słusznie zauważa Autorka pracy, obecny rozwój metody FRA został ukierunkowany na opracowanie narzędzi informatycznych służących do wspomaganie procesu interpretacji uzyskiwanych rezultatów pomiarowych, których ostatecznym celem będzie jego zautomatyzowanie i eliminacja wpływu tzw. subiektywnego czynnika ludzkiego. Droga do osiągnięcia założonego celu jest jednak jeszcze dość długa i wymaga przeprowadzenia wielu prac naukowo-badawczych, przede wszystkim na rzeczywistych transformatorach dużej mocy.

W opinii recenzenta przedstawione w recenzowanej rozprawie doktorskiej Pani Katarzyny Treli wyniki stanowią kolejny krok w rozwoju metody FRA stosowanej od kilkunastu lat w diagnostyce transformatorów energetycznych. Przeprowadzone przez Autorkę badania, w szczególności na transformatorze o mocy 25 MVA wykazały, że możliwe jest stworzenie nowego algorytmu numerycznego, opartego na analizie pola elektromagnetycznego i modelu polowo-obwodowego części aktywnej transformatora, dzięki którym można uzyskać poprawę efektywności odzwierciedlenia zamodelowanych przebiegów odpowiedzi częstotliwościowej jego uzwojeń.

Uwzględniając powyższe, uważam, że tematyka poruszana w pracy jest bardzo aktualna i ma potencjalne znaczenie praktyczne.

Postawionym przez Autorkę rozprawy celem pracy było stworzenie i przetestowanie nowych algorytmów numerycznych, opartych na analizie pola elektromagnetycznego i modelu obwodowego, za pośrednictwem których możliwe jest efektywne wyznaczenie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora energetycznego. Realizacja przyjętego celu pracy dotyczyła zatem analizy dwóch obszarów badawczych:

- a. prawidłowego zamodelowania aktywnej części transformatora przy użyciu metody elementów skończonych,
- b. opracowania nowego modelu obwodowo-polowego, który pozwoliłby na odtworzenie odpowiedzi częstotliwościowej w całym zakresie pomiarowym.

Uważam, że cele pracy są ambitne i w pełni spełniają wymagania stawiane pracom doktorskim.

Teza pracy została sformułowana w sposób jawny w podrozdziale 1.2 i brzmi następująco:

„możliwe jest stworzenie efektywnego algorytmu wyznaczającego odpowiedź częstotliwościową uzwojeń transformatora energetycznego na podstawie jego danych konstrukcyjnych, który pozwoli na usprawnienie procesu oceny stanu technicznego części aktywnej transformatora”.

Teza rozprawy jest poprawna i odpowiednio sformułowana.

Aby udowodnić postawią tezę pracy przyjęto i zrealizowano następujące zadania:

- a. dokonano szczegółowej analizy doniesień publikacyjnych z zakresu problematyki modelowania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora energetycznego;
- b. opracowano autorskie modele polowe transformatorów, dla których:
 - podano warunki równoważności modeli 2D i 3D,
 - wyznaczono zastępczą przenikalność magnetyczną rdzenia,
 - wyznaczono zastępczą konduktywność dla rdzenia spakietowanego,
 - zaproponowano metodykę uwzględniania w opracowanym modelu dodatkowych uzwojeń na rdzeniu,
 - przeprowadzono badania symulacyjne w celu wykazania poprawności działania opracowanego autorskiego modelu polowego;
- c. opracowano i porównano modele obwodowe uzwojeń oraz sprawdzono działania zaproponowanych modeli dla kilku obiektów testowych o zwojach połączonych w sposób szeregowy i równoległy;
- d. przeprowadzono badania symulacyjne weryfikujące działanie zaproponowanego modelu polowego oraz algorytmów obliczeń obwodowych dla uzwojeń rzeczywistego transformatora o mocy 25 MVA i przekładni znamionowej 120/6,3 [kV/kV].

2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 130 stron. Praca zawiera 8 głównych rozdziałów; wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń; spis literatury obejmujący 144. pozycje, wśród których dominującą rolę odgrywają międzynarodowe publikacje wydane na przestrzeni ostatnich kilku lat; spis rysunków oraz tabel, a także streszczenie w języku polskim i angielskim. Doktorantka jest autorką lub współautorką 4 cytowanych w pracy pozycji (*2 x Energies, Applied Sciences, Acta Physica Polonica A*). W rozdziale 1.4 przedstawiono także listę publikacji Autorki związanych z tematem opiniowanej rozprawy doktorskiej, która obejmuje łącznie siedem pozycji literaturowych.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do podjętego tematu. W rozdziale tym zawarto cele i tezę pracy oraz zakres przeprowadzonych przez Autorkę prac naukowo badawczych. W rozdziale tym przedstawiono także strukturę pracy oraz spis publikacji Doktorantki dotyczący przedmiotu rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi omawia podstawy teoretyczne dotyczące diagnostyki transformatorów energetycznych z wykorzystaniem metody FRA. W rozdziale tym przedstawiono także zasady wykonywania pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń, zasady interpretacji otrzymanych wyników oraz w oparciu o przegląd literaturowy nakreślono kierunki rozwoju metody FRA.

W **rozdziale trzecim** dokonano przeglądu aktualnie rozwijanych na świecie kierunków badawczych z zakresu metod modelowania części aktywnej transformatorów energetycznych,

ze szczególnym uwzględnieniem publikacji z zakresu modelowania matematycznego związanego z analizą odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń.

Rozdział czwarty przedstawia zaproponowany przez Doktorantkę sposób modelowania połowego części aktywnej transformatora w przestrzeni dwuwymiarowej. Opisano w nim przyjęte parametry materiału magnetycznego rdzenia. W ramach tej części pracy scharakteryzowano opracowany w ramach badań model połowy w przestrzeni 2D, który następnie dostosowano do modelu w przestrzeni 3D. W rozdziale czwartym przedstawiono również rezultaty badań symulacyjnych, które umożliwiły weryfikację poprawności przyjętych przez Autorkę założeń – porównanie zaproponowanego modelu połowego z wynikami uzyskanymi podczas rzeczywistych pomiarów transformatora rozdzielczego o mocy 800 kVA.

Metodykę wyznaczania parametrów elektrycznych własnych – rezystancji R , indukcyjności L i pojemności C pojedynczych zwojów oraz indukcyjności wzajemnych, i dodatkowych pojemności między zwojami transformatora, przedstawiono w **rozdziale piątym**. Opisany sposób, a także obliczone parametry RLC uzwojeń zostały następnie wykorzystane do dalszych badań naukowych z użyciem opracowanych przez Doktorantkę algorytmów obwodowych wyznaczania odpowiedzi częstotliwościowej.

W **rozdziale szóstym** scharakteryzowano opracowane modele obwodowe z parametrami skupionymi w trzech konfiguracjach – Π , Γ oraz T . Do każdego z modeli opisane zostały równania, na podstawie których opracowany został algorytm obwodowy. Dla zaproponowanych modeli porównane zostały wyniki uzyskane podczas przeprowadzonych symulacji z rzeczywistymi pomiarami odpowiedzi częstotliwościowej zmierzonymi w paśmie $20 \text{ Hz} \div 10 \text{ MHz}$. Poprawność działania opracowanych algorytmów sprawdzono dla dwóch cewek powietrznych o 60. i 324. zwojach, których uzwojenia były połączone w sposób szeregowy oraz dla uzwojenia na rdzeniu o 288. zwojach połączonych w 12 równoległych cewek. W rozdziale tym przeprowadzono także wyniki porównawcze przeprowadzonych symulacji komputerowych z wynikami pomiarów, które uzyskano w trakcie zamodelowania trzech różnych uszkodzeń poosiowych uzwojeń cewki 60. zwojowej umieszczonej w powietrzu.

Rozdział siódmy dotyczy omówienia wyników uzyskanych w trakcie przeprowadzonych symulacji komputerowych z użyciem opracowanych przez Doktorantkę algorytmów, które otrzymano w trakcie zamodelowania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia rzeczywistego transformatora o 25 MVA i przekładni znamionowej 120/6,3 [kV/kV]. Do zamodelowania uzwojenia górnego napięcia analizowanej jednostki, składającego się z 948. zwojów głównych oraz 312. zwojów uzwojenia regulacyjnego wykorzystano zaproponowany w pracy model obwodowo-połowy. Wyznaczone przy pomocy opracowanych algorytmów charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej zostały następnie porównane z przebiegami pomiarów FRA, które uzyskano z użyciem przyrządu pomiarowego FRAnalyzer firmy Omicron.

Podsumowanie i wnioski końcowe zawiera **rozdział ósmy**. W rozdziale tym Doktorantka wskazała na zalety i wady zaproponowanych przez Nią algorytmów oraz określiła kierunek i zakres dalszych prac naukowo-badawczych nad zaproponowanymi w rozprawie modelami odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora.

Za najważniejsze w rozprawie uważam rozdziały: czwarty, piąty, szósty i siódmy, które zawierają wyniki autorskich badań Doktorantki.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktorantki zaliczam:

- przeprowadzenie bardzo starannego przeglądu literaturowego dotyczącego metodyki modelowania numerycznego części aktywnej transformatora energetycznego, w szczególności w aspekcie symulacji odpowiedzi częstotliwościowej jego uzwojeń;
- opracowanie uproszczonego modelu polowego części aktywnej transformatora w przestrzeni dwuwymiarowej, za pomocą którego możliwe jest zredukowanie ilości elementów skończonych w siatce tego modelu, a które uzyskano poprzez wyznaczenie zastępczych parametrów materiału rdzenia – zastępczej przenikalności magnetycznej oraz zastępczą konduktancji;
- uwzględnienie w rozpatrywanych modelach oddziaływania pomiędzy poszczególnymi zwojami, a także wpływu pozostałych uzwojeń i połączeń równoległych między cewkami na odpowiedź częstotliwościową;
- opracowanie nowego algorytmu obliczeń obwodowych o parametrach skupionych w trzech konfiguracjach – Π , Γ oraz T, pozwalającego na wyznaczenie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia transformatora w szerokim zakresie częstotliwości;
- wykazanie, że zaproponowany model polowy i algorytm numeryczny, których podstawowym członem jest pojedynczy zwój, pozwala na zasymulowanie dowolnej deformacji uzwojenia – możliwość wyznaczenia wpływu niewielkich zmian parametrów RLC na przebieg odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia;
- przetestowanie zaproponowanych modeli obwodowo-polowych oraz opracowanych konfiguracji algorytmu dla kilku obiektów testowych;
- opracowanie modelu wielowarstwowego uzwojenia dla rzeczywistego transformatora energetycznego o mocy 25 MVA;
- przeprowadzenie badań symulacyjnych weryfikujących przyjęte założenia autorskiego modelu polowo-obwodowego, jak również efektywności działania opracowanych algorytmów numerycznych dla jednostki transformatorowej o mocy 25 MVA i przekładni 120/6,3 [kV/kV].

Doktoranta w stopniu biegłym opanowała tematykę rozprawy w warstwie nie tylko teoretycznej, ale także praktycznej, w oparciu o dobre rozeznanie problemów technologicznych i naukowych związanych z badaniami symulacyjnymi oraz pomiarami odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów energetycznych. W opinii recenzenta przyjęta przez Autorkę teza rozprawy została udowodniona. Stwierdzam, że Doktoranta dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy z zakresu elektrotechniki.

4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Podział treści rozprawy jest logiczny i uporządkowany. Styl i poziom językowy nie budzi zastrzeżeń. Szata graficzna jest staranna i dopracowana. Praca została zredagowana stylistycznie poprawnie. Zjawiska fizyczne, wywody matematyczne, objaśnienia wzorów i wyników graficznych zostały przedstawione czytelnie. Sposób przekazywania treści jest

wystarczający. Zagadnienia prezentowane w pracy tworzą tematycznie merytoryczną spójność i nie wymagają żadnych zmian. Ujęcie graficzne rysunków, wykresów i fotografii uważam za wystarczające. Dobrze nawiązują one do treści pracy. Czytając rozprawę doktorską odnosi się wrażenie o wysokiej kompetencji merytorycznej Autorki, która potrafi dodatkowo przedstawić swoje wyniki w sposób przyjazny dla odbiorcy. Wszystkie pozycje literaturowe zamieszczone w bibliografii mają swoje odniesienie w treści recenzowanej pracy. W rozprawie można odnaleźć bardzo nieliczne błędy literowe, interpunkcyjne, czy edycyjne, wśród których można wymienić:

1. str. 9 – jest: „ $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – *przenikalność elektryczna [F/m]*”, winno: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – *przenikalność elektryczna próżni [F/m]*”;
2. str. 12, szósta linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „czy”: „... z *setkami, czy tysiącami pojedynczych zwojów.*”;
3. str. 13, trzecia linia od góry – pierwszy raz w tekście pracy pojawia się skrót „MES”, warto byłoby go w tym miejscu rozwinąć, np. Metodą Elementów Skończonych (MES);
4. str. 24 – omyłka pisarska w zdaniu – jest: „..., a krzywa FRA jest wrażliwa na zdarzenia powodujące zmiany w rozplywie strumienia magnetycznego (m.in. zwarcia między cewkami czy wcześniejsze namagnesowanie rdzenia).”, winno „..., a krzywa FRA jest wrażliwa na zdarzenia powodujące zmiany w rozplywie strumienia magnetycznego (m.in. zwarcia między pakietami, czy wcześniejsze namagnesowanie rdzenia).”;
5. str. 26, czternasta linia od góry – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „czy”: „... metody numeryczne [73, 112], czy modele oparte...”;
6. str. 27, pierwsza linia od dołu – w zdaniu „...deformacji mechanicznych ze skutecznością rzędu 95%.” przed wyrazem „rzędu” znajduje się dodatkowa spacja;
7. str. 34, czternasta linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „czy”: „...przełączniki zaczepów, czy wyprowadzenia uzwojeń, ...”;
8. str. 47, trzynasta linia od dołu – zbędne użycie „entera”;
9. str. 59, trzecia linia od dołu – zbędne użycie „entera”;
10. str. 63, piąta linia od dołu – w rozprawie użyto oznaczenia „P” do określenia reluktancji magnetycznej. W literaturze reluktancję oznacza się najczęściej symbolem „R”, a permeancję, będącą odwrotnością reluktancji, literą P. Dodatkowo, na str. 69 oznaczenie literowe „P” przypisano do mocy strat rezystancyjnych. W pracach naukowych, o ile to możliwe, zaleca się unikanie wprowadzania analogicznych symboli do oznaczania różnych zmiennych.

Pragnę jednak zaznaczyć, że zawarte w recenzji drobne uwagi i zastrzeżenia edytorskie nie wpływają w żaden sposób na wartość merytoryczną przedłożonej rozprawy doktorskiej.

5. Uwagi merytoryczne i pytania dyskusyjne

1. W rozdziale 6.3.2 pracy przedstawiono wyniki symulacji oraz pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej cewki uzwojenia transformatora rozdzielczego o mocy 800 kVA. Do badań symulacyjnych wykorzystano zaprezentowany na rys. 6.3.6 model 2D, który

składał się z 18. dwuwarstwowych dysków. Na rys. 6.3.5 przedstawiono widok ogólny badanej cewki, który zawiera nie 18., lecz 22 dwuwarstwowe dyski. Bardzo proszę o wyjaśnienie rozbieżności w ilości dysków przyjętych podczas weryfikacji algorytmów Π , Γ i T dla stworzonego modelu 2D uzwojenia, a liczbą rzeczywistą dysków uzwojenia, na którym wykonano pomiary przyrządem FRAnalyzer. Czy różnice w ilości dysków uzwojenia przyjętych w fazie symulacji, a następnie pomiarów weryfikujących opracowane algorytmy, mogłyby w sposób znaczący wpłynąć na wyniki zaprezentowane na rys. 6.3.7?

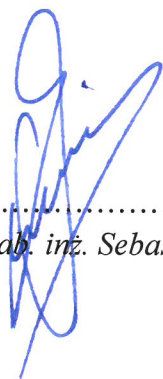
2. Na str. 83. rozprawy Doktorantka stwierdza, że: „*Opisany model cewki 60-zwojowej poddawany był podobnej analizie we wcześniejszych badaniach zaprezentowanych w [47], jednak podczas badań przeprowadzanych na potrzeby niniejszej pracy zastosowano inne algorytmy obliczeń obwodowych, które obejmują inne konfiguracje i wykazują się większą dokładnością.*” Bardzo proszę o rozwinięcie i doprecyzowanie użytego sformułowania: „większa dokładność”. W jaki sposób i na podstawie jakich determinantów porównawczych można sformułować powyższy wniosek? Czy uzyskanie przez Autorkę z użyciem zaproponowanych przez Nią algorytmów większej dokładności odwzorowania przebiegów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń, w stosunku do wyników przedstawionych w publikacji [47], da się w jakiś obiektywny sposób opisać, np. z wykorzystaniem wskaźników liczbowych?
3. W ramach pracy przeprowadzono badania symulacyjne mające na celu weryfikację zaproponowanych przez Doktorantkę modeli polowych i algorytmów obwodowych w konfiguracji Π , Γ i T dla zamodelowania uszkodzeń cewki uzwojenia w sposób kontrolowanej deformacji poosiowej. W przypadku narażenia transformatora energetycznego na oddziaływanie prądów zwarciovych zwykle najpierw dochodzi do odkształceń promieniowych, a dopiero później do poosiowych, gdyż cewki uzwojenia są dość skutecznie doprasowane osiowo przez śruby dociskowe jarzma górnego i dolnego. Czy opracowane przez Doktorantkę modele polowo-obwodowe oraz algorytmy umożliwiają zasymulowanie przebiegów odpowiedzi częstotliwościowej pochodzących od uszkodzeń promieniowych uzwojenia? Czy były już prowadzone takie badania i ewentualnie jaki był ich rezultat ?
4. W ramach zrealizowanej rozprawy doktorskiej opracowane przez Doktorantkę algorytmy użyte do symulacji odpowiedzi częstotliwościowej badanych uzwojeń zostały poddane weryfikacji pomiarowej z wykorzystaniem aparatury diagnostycznej FRAnalyzer firmy Omicron. Ocenę efektywności każdego z opracowanych algorytmów obwodowych w konfiguracji Π , Γ i T oparto zatem na analizie porównawczej z rezultatami uzyskanymi z pomiarów FRA. Bardzo proszę o krótkie scharakteryzowanie użytej przez Autorkę metodyki porównawczej oraz przyjętych kryteriów, którymi kierowała się przy wskazywaniu algorytmu najlepiej odwzorowującego rzeczywisty przebieg odpowiedzi częstotliwościowej uzyskanych dla danego obiektu.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną do recenzji rozprawę należy zaliczyć do grupy prac symulacyjno-eksperymentalnych, które są pracami wysoce czasochłonnymi. Ponadto wymagają one od badacza dużych umiejętności z różnego zakresu elektrotechniki, np. teorii obwodów, teorii pola elektromagnetycznego, materiałoznawstwa elektrotechnicznego, metrologii, a także znajomości zagadnień z zakresu rachunku całkowego i różniczkowego. W opinii recenzenta Doktorantka posiadała umiejętność planowania eksperymentu naukowo-badawczego oraz realizacji zaawansowanych symulacji komputerowych przy wykorzystaniu zaawansowanych narzędzi informatycznych. W bardzo dobrym stopniu Doktorantka opanowała także technologię przygotowania materiału badawczego i technicznego przeprowadzonych prac analityczno-empirycznych. Wykazała się także umiejętnością szczegółowej oceny wyników otrzymanych badań. Doktorantka wykazała, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązała w sposób oryginalny zagadnienie naukowe będące tematem rozprawy.

Rozwiązanie problemu postawionego w pracy jest ciekawe nie tylko z naukowo-poznawczego punktu widzenia, lecz przede wszystkim z tego, iż zaprezentowane w pracy wyniki mogą być w przyszłości wykorzystane do dalszego rozwoju metody FRA jako jednej z metod oceny stanu technicznego konstrukcji mechanicznej rdzeni oraz uzwojeń transformatorów energetycznych. Praca zawiera elementy nowości w sensie naukowym, stanowiące udokumentowany dorobek własny Doktorantki.

Stwierdzam, że opiniowana praca jest kompletna i nie wymaga żadnych zmian ani uzupełnień. Spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w stosownej ustawie. Wnioskuje o przyjęcie niniejszej dysertacji jako rozprawy doktorskiej. Wnoszę jednocześnie o dopuszczenie Pani mgr inż. Katarzyny Treli do publicznej obrony przedłożonej pracy w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.



.....
prof. dr hab. inż. Sebastian Borucki