

Prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka
Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, 19.05.2025 r.

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

21-05-2025

WPŁYNĘŁO

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Wojciecha Ludowicza

**Polowa analiza rozprywu prądów przesunięcia dielektrycznego
w wysokoczęstotliwościowych układach z polem elektromagnetycznym**

w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*

wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne* DR-012/16/2025 z dnia 18.03.2025 r.

1. Tematyka i zakres rozprawy

Rozprawa dotyczy problemów obliczeniowych pól elektromagnetycznych dużych częstotliwości przy uwzględnieniu prądów wirowych, prądów przesunięcia dielektrycznego, a także nieliniowości materiałów.

W Rozdziale 1. rozprawy sformułowano jej cele badawcze i tezę naukową. W Rozdziale 2. dokonano przeglądu metod numerycznych stosowanych w analizie pola elektromagnetycznego, a w Rozdziale 3. przedstawiono modele stosowane w analizie pól elektromagnetycznych przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Rozdział 4. zawiera omówienie metod stosowanych w analizie pola elektromagnetycznego przy uwzględnieniu prądów przesunięcia dielektrycznego. „W rozdziale tym Autor pracy przedstawił efektywną metodę umożliwiającą analizę obszaru, w którym występuje zmienne w czasie pole elektromagnetyczne w dziedzinie częstotliwości i czasu. Dla każdego z zaprezentowanych podejść sformułowane zostały odpowiednie równania początkowe, a także końcowe układy równań”. Rozdział 5, zatytułowany Wyniki badań, zawiera opis osiągnięć Autora rozprawy. Przedstawiono w nim wyniki obliczeń przeprowadzonych za pomocą opracowanego oprogramowania autorskiego w strukturze dławika elektromagnetycznego o specyficznych parametrach materiałowych rdzenia ferrytowego. Wyniki te porównano z wynikami otrzymanymi przy wykorzystaniu oprogramowania COMSOL Multiphysics. Rozprawa kończy się Podsumowaniem i Wnioskami końcowymi (Rozdział 6) oraz Spisem literatury.

2. Ocena wyboru tematu i celu rozprawy

Problemy modelowania urządzeń elektrycznych wysokich częstotliwości to bez wątpienia ważne i skomplikowane problemy współczesnej elektrotechniki, tak więc wszelkie badania umożliwiające analizę wpływu pól o wysokiej częstotliwości na właściwości magnetyczne i elektryczne nowoczesnych materiałów ferromagnetycznych należy uznać za uzasadnione, zarówno pod względem naukowym, jak i praktycznym.

Głównym celem rozprawy było „opracowanie algorytmów oraz procedur numerycznych umożliwiających efektywną analizę rozkładu pola elektromagnetycznego z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych oraz przesunięcia dielektrycznego przetwornika elektromagnetycznego zasilanego ze źródeł wyższych częstotliwości”. Teza pracy brzmi: „W analizie rozkładu pola elektromagnetycznego układów przetworników elektromagnetycznych istnieje możliwość uwzględnienia wpływu prądów przesunięcia dielektrycznego na wypadkowy rozkład pola elektromagnetycznego poprzez zastosowanie sprzężonej analizy częstotliwościowo-czasowej w połączeniu z modelami polowymi wykorzystującymi wielostopniowe ujęcie metody elementów skończonych. Zastosowanie powyższych modeli numerycznych zapewnia przyspieszenie obliczeń symulacyjnych dotyczących analizy rozptyłu prądów przesunięcia dielektrycznego w układach z polem trójwymiarowym i tym samym przyspieszenie procesu projektowego przetworników elektromagnetycznych zasilanych ze źródeł wysokich częstotliwości”.

Zgadzam się z tezą, iż „przyspieszenie procesu projektowego” skomplikowanych i zminiaturyzowanych urządzeń elektrycznych wysokich częstotliwości jest bardzo ważne, jednak równie ważna jest poprawa dokładności tego procesu i jakości otrzymywanych wyników, co również było efektem wdrożenia zaproponowanych przez Autora algorytmów obliczeniowych.

Uważam, że cel pracy i jej teza zostały sformułowane właściwie, zarówno pod względem naukowym, jak i z punktu widzenia zastosowań.

3. Ocena wartości naukowej rozprawy

Rozprawa stanowi kontynuację prac renomowanej Poznańskiej Szkoły Elektrotechniki (pozycje [28,34,35,42,43,44,45,75,76,79,80,81,82,83] Spisu literatury). Wykorzystując wyniki wcześniejszych badań różnych autorów, mgr inż. Wojciech Ludowicz opracował własne algorytmy obliczeniowe trudnych przypadków pól elektromagnetycznych i dokonał ich implementacji programowej.

Jego głównym osiągnięciem jest opracowanie algorytmów HBFEM (metoda bilansu harmonicznego połączona z metodą elementów skończonych) wykorzystujących metodę elementów skończonych do analizy obszarów z polem elektromagnetycznym oraz metodę bilansu harmonicznego do analizy układów nieliniowych.

Przekształcając równania Maxwella i wykorzystując odpowiednie ich sformułowania oraz różne potencjały pola Autor zapisał w postaci macierzowej zależności opisujące reluktancyjno-konduktancyjno-pojemnościowe modele siatkowe opisujące rozkład pola elektromagnetycznego w badanych układach w dziedzinie częstotliwości i czasu.

W stworzonym oprogramowaniu zaimplementowane zostały m.in. funkcjonalności takie, jak: analiza 3D obszarów z polem magnetycznym wykorzystująca wektorowy potencjał magnetyczny, analizę 3D obszarów z prądami wirowymi oraz prądami przesunięcia dielektrycznego poprzez zastosowanie modeli o sprzężonych siatkach reluktancyjno-konduktancyjno-pojemnościowej oraz sformułowaniu $A-V$, wprowadzenie wymuszenia napięciowego w analizie układu poprzez zastosowanie siatki reluktancyjnej i sformułowania $A-T_0$ dla obszarów uzwojeń o cienkich przewodach, możliwość wprowadzenia okresowego wymuszenia o dowolnym kształcie przebiegu dzięki wykorzystaniu metody bilansu harmonicznym HBM, włączenie do analizy wpływu nasycenia rdzenia poprzez implementację metody bilansu harmonicznym HBM.

Stworzenie tego instrumentarium obliczeniowego umożliwiło Autorowi wszechstronne badanie struktury dławika elektromagnetycznego posiadającego rdzeń ferrytowe wykonany w technologii proszkowej. Autor stworzył dwuwymiarowe i trójwymiarowe modele dławika i wykonał wiele obliczeń pól elektromagnetycznych dla różnych wymuszeń (sinusoidalnego napięcia o częstotliwości 1 kHz i napięcia o przebiegu prostokątnym i częstotliwości 150 kHz). Wyniki obliczeń numerycznych przedstawione w Rozdziale 5. zawierają m.in. przebiegi czasowe prądu cewki dławika, rozkłady gęstości strumienia magnetycznego, rozkłady gęstości prądów wirowych, rozkłady gęstości prądu przesunięcia dielektrycznego, przebiegi czasowe gęstości prądów wirowych i prądów dielektrycznych w rdzeniu dla różnych wymuszeń w strukturach 2D i 3D dławika.

Porównanie otrzymanych wyników z wynikami uzyskanymi dla identycznych (podobnych) modeli w programie COMSOL Multiphysics wykazało, iż zaproponowane przez Autora algorytmy obliczeniowe są znacznie szybsze i wymagają mniejszych zasobów sprzętowych niż ww. oprogramowanie komercyjne.

Uważam, że rozprawa dotyczy ważnych i aktualnych problemów naukowych, a sposób argumentacji Autora jest poprawny.

4. Uwagi dyskusyjne

Uważam, że niewłaściwe są proporcje pomiędzy opisem stanu zagadnienia, a opisem osiągnięć własnych Autora. Cztery pierwsze rozdziały są opisem stanu zagadnienia, co następnie wykorzystane zostało do opracowania specjalistycznego oprogramowania do analizy różnych przypadków pól elektromagnetycznych. Część tę można było skrócić pomijając sprawy oczywiste.

Porównanie otrzymanych wyników zostało wykonane dla identycznych (podobnych) modeli w programie COMSOL Multiphysics, co jest tylko częściowym potwierdzeniem użyteczności

nowego oprogramowania – brak jest tu jednak porównania z wynikami badań empirycznych. Mogłyby to być porównanie z wynikami otrzymanymi przez innych autorów dla ważnych konfiguracji praktycznych.

Uważam również, iż konieczne byłoby porównanie całkowitych strat mocy w analizowanych strukturach przy uwzględnieniu różnych składników (m.in. z prądami przesunięcia dielektrycznego i bez ich uwzględniania).

Autor zdaje sobie sprawę z ograniczeń w stosowaniu proponowanych przez niego metod. Ważne byłoby sformułowanie wyraźnych zaleceń dla projektanta wykorzystującego to oprogramowanie. Co należałoby wziąć jeszcze pod uwagę dla udoskonalenia proponowanych algorytmów?

5. Inne uwagi

Rozprawa napisana jest dość starannie. Niekiedy Autor posługuje się językiem żargonowym; w tekście zdarzają się błędy stylistyczne, a także błędy interpunkcyjne.

W całym tekście autor niepotrzebnie używa apostrofu w deklinacji niepolskich nazwisk. Użycie apostrofu w większości tych przypadków nie ma uzasadnienia, a poprawny jest zapis fonetyczny.

Rysunki 3.11 i 5.3 są identyczne. W Rozdziale 5.3 wystarczyło powołać się na Rys. 3.11.

6. Ostateczna ocena rozprawy

Za najważniejsze osiągnięcia Autora uznać należy:

1. Syntetyczny opis różnych wariantów metody elementów skończonych dla wysokich częstotliwości.
2. Opracowanie algorytmów HBFEM 2D i 3D umożliwiających analizę częstotliwościowo–czasową układów elektromagnetycznych.
3. Uwzględnienie wpływu indukowania się prądów wirowych i przesunięcia dielektrycznego w rdzeniu kompozytowym na wypadkowy rozkład pola elektromagnetycznego w różnych obiektach.
4. Opracowanie numerycznych modeli obliczeniowych 2D i 3D dławika elektromagnetycznego przy uwzględnieniu różnych wymuszeń, konfiguracji i parametrów materiałowych, a także metodyki ich analizy.

Są to bez wątpienia ważne problemy badawcze, których oryginalne rozwiązanie przedstawiono w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

Wysoko ocenić należy wiedzę i umiejętności Autora w zakresie tworzenia i wykorzystania bardzo zaawansowanych polowych modeli obliczeniowych, wykorzystania specjalistycznego

oprogramowania do analizy polowej oraz modelowania skomplikowanych obiektów elektrotechnicznych.

Część wyników badań przedstawionych w rozprawie opublikowano już w artykule Autora (pozycja [27] Spisu literatury), a więc poddana była już ocenie środowiska naukowego zajmującego się podobną problematyką, co jest dodatkowym zaświadczeniem aktualności badań i aktywności naukowej Kandydata.

Uważam, że dokonania opisane w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Ludowicza świadczą o Jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wysoki poziom teoretyczny rozprawy i wymienione powyżej osiągnięcia uzasadniają wniosek o wyróżnienie tej rozprawy.

7. Wniosek końcowy

Sposób formułowania celów badawczych przez Autora rozprawy, ich realizację i weryfikację oceniam wysoko. W świetle wskazanych powyżej faktów uważam również, że teza pracy została udowodniona i cel pracy został osiągnięty.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Ludowicza *Polowa analiza rozptyłu prądów przesunięcia dielektrycznego w wysokoczęstotliwościowych układach z polem elektromagnetycznym* spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* stawiane rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Ryszard Pałka