

dr hab. inż. Burlikowski Wojciech, Prof. Pol.Śl.

Katedra Mechatroniki

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

Gliwice 14.05.2025r.

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKI POZNAŃSKA

20-05-2025

WPŁYNEŁO

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

Autor: **mgr. inż. Wojciech Ludowicz**

*Niniejszą recenzję wykonano na podstawie uchwały nr 89/2024-2028 Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Poznańskiej z dn. 18 marca 2025 r.
oraz pisma Przewodniczącego RDAEEiTK Politechniki Poznańskiej
Prof. dr hab. inż. Wojciecha Szelaąga nr DR-012/16/2025 z dn. 21 marca 2025 r.*

I. Wybór tematu

Problem uwzględnienia efektów związanych z prądami przesunięcia dielektrycznego w analizie układów z polem elektromagnetycznym staje się coraz istotniejszy w związku z wykorzystaniem nowych rodzajów materiałów w konstrukcji obwodu magnetycznego oraz wzrostem częstotliwości zasilania tych urządzeń.

W przedstawionej pracy podjęto próbę zastosowania metody elementów skończonych w połączeniu z metodą bilansu harmonicznych w celu przyspieszenia obliczeń i zmniejszenia wykorzystania zasobów komputera w przypadku analizy tego typu układów w stosunku do klasycznych metod analizy wykorzystujących w tym celu solwery typu „transient”. Metoda ta pozwala na znaczne szybsze uzyskanie wyników w przypadku stanów ustalonych z zasilaniem będącym okresową funkcją czasu.

II. Cel pracy – zakres i teza

Podstawowym celem pracy było opracowanie metod i algorytmów pozwalających na wykorzystanie metody elementów skończonych w połączeniu z metodą bilansu harmonicznych w analizie układów z polem elektromagnetycznym przy uwzględnieniu efektów związanych z prądami przesunięcia dielektrycznego.

Autor w rozdziale 1 pracy sformułował cel pracy oraz związaną z nim ściśle tezę w brzmieniu:

„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.”

W trakcie realizacji pracy powyższa teza uległa pewnej modyfikacji czego dowodem jest również tytuł rozprawy *„Polowa analiza rozptyłu prądów przesunięcia dielektrycznego w wysokoczęstotliwościowych układach z polem elektromagnetycznym”*. Modyfikacja ta polegała na zastąpieniu wyrażenia *„układach przetworników elektromagnetycznych”* wyrażeniem *„układach z polem elektromagnetycznym”*. W mojej opinii jest to uzasadnione w celu uniknięcia nieporozumień, gdyż pojęcie *„przetworniki elektromagnetyczne”* sugerowałoby konieczność uwzględnienia w algorytmie problemu ruchu mechanicznego [Stöltzing, HD. (2004). Electromagnetic Actuators. In: Janocha, H. (eds) Actuators. Springer, Berlin, Heidelberg]. Dowodem tej zmiany jest pojawiające się w rozdziale 6, str.103/104 sformułowanie *„W pracy udowodniono, że istnieje możliwość analizy układów z polem elektromagnetycznym uwzględniając wpływ indukowanych prądów wirowych i przesunięcia dielektrycznego, a także nasycenia rdzenia, poprzez wykorzystanie sprzężonej analizy częstotliwościowo-czasowej i tym samym przyspieszenia procesu obliczeń”*. W dalszej części recenzji ta modyfikacja zostanie uwzględniona.

III. Charakterystyka pracy i metodyka badań

Rozprawa obejmuje spis treści, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazy ważniejszych skrótów i oznaczeń, sześć rozdziałów merytorycznych oraz spis literatury, zawarte na łącznie 114 stronach tekstu. Literatura obejmująca 104 pozycje wśród których tylko jedna jest publikacją współautorską doktoranta.

W rozdziale pierwszym nakreślono ogólną problematykę zastosowania metod numerycznych w szeroko rozumianej inżynierii ze szczególnym uwzględnieniem ich wykorzystania w elektrotechnice. Szczególną uwagę zwrócono na problematykę analizy pola elektromagnetycznego w różnego typu materiałach wykorzystywanych w budowie urządzeń elektrotechnicznych i wpływie ich własności na otrzymane rozwiązanie numeryczne. W rozdziale tym sformułowano cel pracy, postawiono związaną z nim tezę oraz omówiono zawartość kolejnych rozdziałów.

Rozdział drugi zawiera ogólny opis metod numerycznych wykorzystywanych w analizie pola elektromagnetycznego. W rozdziale tym opisano również tematykę parametrów materiałów magnetycznych proszkowych, w szczególności ferrytów manganowo-cynkowych, która to tematyka stanowiła punkt wyjścia w przedstawionej w pracy problematyce.

Rozdział trzeci przedstawia opis metody elementów skończonych z uwzględnieniem tematyki dotyczącej różnych rodzajów elementów wykorzystywanych w jej implementacjach. W rozdziale tym sformułowano podstawowe równania oraz przedstawiono ich interpretację geometryczną. Pozwoliło to autorowi na sformułowanie dwu- i trójwymiarowych modeli reluktancyjno-konduktancyjno-pojemnościowych, których implementacje zostały wykorzystane w dalszej części pracy.

Rozdział czwarty, w mojej opinii najbardziej istotny z punktu widzenia otrzymanych rezultatów, zawiera opis 3 metod wykorzystywanych w analizie układów, w których uwzględniany jest prąd przesunięcia dielektrycznego. Dwie pierwsze z opisanych metod, metoda częstotliwościowa oraz czasowa, są metodami powszechnie znanymi w literaturze i to zarówno w odniesieniu do modeli obwodowych jak i polowych. Natomiast trzecia z opisanych metod stanowi własne rozwiązanie autora rozprawy pozwalające na znaczące przyspieszenie obliczeń w stosunku do metody czasowej oraz rozszerzenie zakresu stosowalności

w odniesieniu do metody częstotliwościowej. Metoda ta określona została przez autora akronimem HBFEM (z ang. Harmonic Balance Finite Element Method) i stanowi praktyczną realizację celu jaki został postawiony w pracy oraz związanej z nim tezy.

Rozdział piąty zawiera numeryczną weryfikację modeli opisanych w rozdziale 4 przeprowadzoną poprzez porównanie otrzymanych na ich podstawie wyników z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem oprogramowania Comsol Multiphysics. Modelowanymi urządzeniami były dławiki z rdzeniami wykonanymi z ferrytu proszkowego o parametrach przedstawionych na Rys.5.5 oraz w Tabeli 5.1. W przypadku modelu 2D dławik posiadał symetrię osiową. W opisie przedstawiono schematy blokowe algorytmów wykorzystywanych w modelach 2D i 3D. Analizie poddano 2 przypadki zasilania:

- zasilanie napięciowe sinusoidalne o częstotliwości 1 [kHz],
- zasilanie napięciowe o przebiegu prostokątnym i częstotliwości 150 [kHz].

W oprogramowaniu referencyjnym Comsol Multiphysics w analizowanym przypadku istniała wyłącznie możliwość wykorzystania solvera typu „transient”. Otrzymane wyniki w obu przypadkach zasilania zarówno dla modelu 2D jak i 3D wskazują na bardzo dobrą zgodność rezultatów otrzymanych z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania doktoranta i oprogramowania referencyjnego.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie pracy i wskazuje na możliwość implementacji przedstawionych algorytmów w oprogramowaniu komercyjnym. W mojej opinii jest to w pełni uzasadniona nadzieja na co wskazują pojawiające się specjalne algorytmy pozwalające na przyspieszenie obliczeń związanych ze stanami ustalonymi m.in. w przypadku oprogramowania ANSYS Maxwell (HPC).

IV. Wartość merytoryczna pracy

W mojej opinii na bardzo wysoką ocenę przedstawionej pracy wpływa niezwykle skomplikowany charakter zastosowanych w niej modeli matematycznych. Ich implementacja komputerowa oraz potwierdzenie ich poprawności przez porównanie z wynikami otrzymanymi z wykorzystaniem oprogramowania Comsol Multiphysics pozwala na uznanie ich za skuteczne narzędzie analizy w ramach przedstawionej w pracy tematyki.

Do oryginalnych osiągnięć autora należy zaliczyć:

1. opracowanie nowych, szybkobieżnych procedur i algorytmów, które umożliwiłyby analizę częstotliwościowo-czasową układów z trójwymiarowym polem elektromagnetycznym z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych, przesunięcia dielektrycznego, a także nasycenia rdzenia na wypadkowy rozkład pola,
2. implementacja powyższych algorytmów z wykorzystaniem wielostopniowego ujęcia Metody Elementów Skończonych oraz kombinacyjnej metody bilansu harmonicznych HB oraz punktu ustalonego FP w postaci metody określonej angielskim akronimem HBFEM (z ang. Harmonic Balance Finite Element Method),
3. weryfikacja metody HBFEM w przypadku modelu dwu- i trójwymiarowego dla różnych przebiegów napięcia zasilania i różnych konstrukcji rdzenia dławika z wykorzystaniem oprogramowania referencyjnego Comsol Multiphysics.

V. Uwagi szczególne i edycyjne

1. zbyt częste wykorzystanie terminologii angielskiej lub będącej jej dosłownym tłumaczeniem w przypadku, gdy istnieje całkowicie równoważna terminologia w języku polskim np.
 - a. „gęstość strumienia magnetycznego” zamiast „indukcja magnetyczna” (np. Rys. 5.15),
 - b. „konwergencja” zamiast „zbieżność” (np. str.13),
 - c. „wysokie stany saturacji” zamiast „stan silnego nasycenia” (np. str.13),
 - d. „domena” zamiast „dziedzina” (np. Tabela 4.1),
 - e. „z replikowania” zamiast „powtórzenia” (str.12),
2. niepoprawne wymiarowanie na rysunkach Rys.5.4 i Rys.5.22 (np. zamknięcie łańcucha wymiarowego),
3. błąd w zdaniu „zwiększenie próbek czasowych” – powinno być „zwiększenie liczby próbek czasowych” (str.13),

4. błąd w zdaniu „Metoda Elementów Skończonych MES wraz jej interpretacjami” - powinno być „Metoda Elementów Skończonych MES wraz z jej interpretacjami” (str.15),
5. błąd w zdaniu „rdzeniu ferrytowym wykonanym na jako” - powinno być „rdzeniu ferrytowym wykonanym jako” (str.18),
6. błąd w zdaniu „zestaw sześciu równań” - powinno być „zestaw pięciu równań” (str.20),
7. błąd w zdaniu „podczas pracy strukturami” - powinno być „podczas pracy ze strukturami” (str.22),
8. błędy w Tabeli 2.2 – w trzech ostatnich wierszach kolumny „Równania” powinno być „ σ^{-1} ”,
9. błąd w zdaniu „Celem metody FDTD jest na rozwiązanie” - powinno być „Celem metody FDTD jest rozwiązanie” (str.30),
10. błąd w zdaniu „elektrycznego wzadany kierunku” - powinno być „elektrycznego w zadany kierunku” (str.34),
11. błąd w zdaniu „siatkę dyskretyzacyjną” - powinno być „siatkę dyskretyzacyjną” (str.35),
12. błąd w zdaniu „gdzie: δ oraz ε reprezentują odpowiednio przenikalność elektryczna i dielektryczną” - powinno być „gdzie: σ oraz ε reprezentują odpowiednio przewodność elektryczna i przenikalność dielektryczną” (str.51),
13. błąd w zdaniu „zarówno dziedzinie” - powinno być „zarówno w dziedzinie” (str.67),
14. błąd w zdaniu „oraz o oczekiwanego” - powinno być „oraz oczekiwanego” (str.68),
15. błąd w zdaniu „komercyjnym celu weryfikacji” - powinno być „komercyjnym w celu weryfikacji” (str.68).

VI. Pytania i uwagi dyskusyjne

1. Brak weryfikacji pomiarowej przedstawionej metody obliczeń. Czy autor rozważa możliwość jej przeprowadzenia?
2. Czy autor może określić przy jakich wartościach częstotliwości istnieje możliwość pomiarowego wydzielenia ze strat całkowitych ich składnika dielektrycznego przy widocznej w wynikach olbrzymiej przewadze strat wirowych?
3. Brak otwartego określenia zakresu zastosowania przedstawionej metody do stanów ustalonych.
4. Brak w cytowanej literaturze odniesienia do użycia metody bilansu harmonicznych w odniesieniu do maszyn elektrycznych (np. RUSEK J., Komputerowa analiza maszyny indukcyjnej z wykorzystaniem bilansu harmonicznych, AGH, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2000).
5. Dlaczego ani w modelu 2D (symetria w płaszczyźnie na $\frac{1}{2}$ wysokości w osi Z) ani w modelu 3D (symetria względem wszystkich płaszczyzn układu XYZ umożliwiająca uwzględnienie jedynie $\frac{1}{8}$ objętości modelu) nie wykorzystano symetrii obiektu? Pozwoliłoby to znacznie zmniejszyć wielkość modelu numerycznego szczególnie w odniesieniu do przypadku 3D.
6. Czy autor widzi możliwość rozszerzenia stosowalności sformułowanej metody na przypadek wirujących przetworników elektromechanicznych np. dla stałej prędkości obrotowej (odpowiednikiem 2D jest oprogramowanie ANSYS Motor-CAD) ?
7. Czy autor rozważał możliwość rozbudowania modelu o moduł termiczny (odpowiednikiem 2D jest oprogramowanie ANSYS Motor-CAD) ?
8. Dlaczego w przypadku obliczeń 2D nie wykorzystano możliwości zrównoleglenia obliczeń (Tabela 5.5) w przeciwieństwie do przypadku 3D (Tabela 5.6)?
9. Dlaczego autor używa odrębnie pojęć „przenikalność elektryczna” i „przenikalność dielektryczna” (str.14)?.

VII. Podsumowanie

Należy zaznaczyć, że pytania i uwagi dyskusyjne nie umniejszają walorów merytorycznych tej pracy, a jedynie ubogacą dyskusję podczas publicznej obrony.

Brak weryfikacji pomiarowej przedstawionej metody obliczeń stanowi w mojej opinii wadę, jednak ze względu na fakt, iż praca ma charakter symulacyjny uważam przeprowadzoną weryfikację za wystarczającą na aktualnym etapie badań.

Reasumując Rozprawa Doktorska pt. *„Polowa analiza rozplywu prądów przesunięcia dielektrycznego w wysokoczęstotliwościowych układach z polem elektromagnetycznym”*, której autorem jest mgr inż. Wojciech Ludowicz w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne **spełnia** kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Wojciecha Ludowicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.



dr hab. inż. Burlikowski Wojciech, Prof. Pol.Śl.