



# UNIwersytet Warszawski

Prof. dr. hab. Andrzej Wysmołek

Wydział Fizyki

ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

e-mail: [Andrzej.Wysmolek@fuw.edu.pl](mailto:Andrzej.Wysmolek@fuw.edu.pl)

Warszawa, 7 stycznia 2020

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Nowaka pt. „Tomografia wiropądowa elementów cylindrycznych”**

Zastosowanie różnego rodzaju metod tomograficznych znajduje cieszy się coraz szerszym zainteresowaniem w badaniach nieniszczących. Szczególnie znane są metody stosowane we współczesnej diagnostyce medycznej, takie jak, tomografia rentgenowska (powszechnie znana jako tomografia komputerowa), tomografia jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR), emisyjna tomografia pozytonowa (PET). Wraz z postępującym procesem automatyzacji oraz wzrostem mocy obliczeniowej współczesnych komputerów, metody tomograficzne są coraz powszechniej stosowane w różnych gałęziach przemysłu.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Nowaka podejmuje tematykę dotyczącą wykorzystania tomografii wiropądowej. Z punktu widzenia fizyki jej istotą jest badanie prądów wirowych powstających w materiale pod wpływem pobudzenia elektromagnetycznego o określonej częstotliwości i rozkładzie przestrzennym. Kluczowym elementem całego procesu, warunkującym jego przydatność w praktyce, jest przekształcenie odwrotne dające się zrealizować w akceptowalnym dla użytkownika czasie, przy możliwie niskich kosztach. Stanowi to główny cel rozprawy, która skupia się na badaniach obiektów osiowosymetrycznych, w szczególności wykonanych z materiałów ferromagnetycznych. Mogłoby się wydawać, że jest to bardzo uproszczone zagadnienie, jednak dostarcza ono cennych informacji warunkujących wykorzystanie metod wiropądowych w praktyce. W ramach pracy zaproponowano zastosowanie trójwymiarowego modelowania rozkładu pola magnetycznego oraz powiązanego z nim rozkładu prądów wirowych w badanym obiekcie. Zaproponowano wykorzystanie metody elementów skończonych do opracowania tomograficznego przekształcenia odwrotnego do analizy wyników pomiarów uzyskanych za pomocą tomografu wiropądowego. Działania te posłużyły do udowodnienia tezy, że „zastosowanie zaproponowanego tomograficznego przekształcenia odwrotnego umożliwi określenie parametrów obiektu odwzorowujących nieciągłość rzeczywistą z dokładnością wymaganą do zastosowań praktycznych”. W mojej opinii mgr inż. Paweł Nowak tę tezę udowodnił.

Praca liczy 130 stron i składa się z dziesięciu rozdziałów oraz bibliografii. Pierwszy rozdział (Wstęp) umiejscawia tematykę pracy w szerszym kontekście badań tomograficznych, ze szczególnym

uwzględnieniem rozwoju tomografii rentgenowskiej oraz zalet tomografii wiroprowadowej, która nie wymaga specjalnych zabezpieczeń związanych z niebezpiecznym dla życia promieniowaniem. Autor zauważa jednak, że w literaturze przedmiotu brak jest pełnej propozycji zastosowania tomografii wiroprowadowej obejmującej zarówno metodę pomiarową, konstrukcję stanowiska pomiarowego jak też tomograficznego przekształcenia odwrotnego, w szczególności w odniesieniu do obiektów osiowosymetrycznych. Wydaje się, że argument związany z koniecznością przechowywania dużej ilości danych staje się coraz mniej znaczący dla rozwoju dowolnego typu tomografii. Chciałbym jednak poznać opinię mgr inż. Pawła Nowaka na ten temat.

W rozdziale 2. przedstawiono szczegółowo cel i zakres pracy. Wyszczególniono tam dobór oprogramowania na licencji open-source, opracowanie tomograficznego przekształcenia prostego, opartego o metodę elementów skończonych, optymalizację obliczeniową umożliwiającą przyspieszenie realizacji przekształcenia prostego bez utraty informacji, określenie czułości tomografu wiroprowadowego, opracowanie algorytmu tomograficznego przekształcenia odwrotnego opartego o optymalizację dyskretną, opracowanie tomograficznego przekształcenia odwrotnego wykorzystującego prostopadłościenną nieciągłości modelowe oraz propozycję wytycznych dotyczących zastosowań tomografii wiroprowadowej w badaniach nieniszczących.

Rozdział 3 stanowi dobry przegląd stanu wiedzy na temat pomiarów tomograficznych, a w szczególności pozyskiwania danych, przekształcenia tomograficznego prostego oraz przekształcenia odwrotnego, w sytuacji gdy wykorzystanie metod analitycznych jest zawodne, a do dyspozycji pozostają jedynie metody iteracyjne bazujące na algorytmach optymalizacyjnych. Dużą część rozdziału 3 stanowi omówienie podstaw fizycznych tomografii wiroprowadowej, z uwzględnieniem zjawisk elektromagnetycznych opisywanych przez równania Maxwella oraz ich rozwiązań z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W rozdziale tym przedstawiono różne potencjały skalarne i wektorowe pod kątem ich wykorzystania w symulacjach zjawisk elektromagnetycznych ważnych w tomografii wiroprowadowej. Szczególnie ważna jest analiza modeli, w których uzyskanie jednoznacznego rozwiązania wymaga wprowadzania dodatkowych ograniczeń na potencjał wektorowy, co zostało wykorzystane w części praktycznej pracy.

W rozdziale 4 opisano stanowisko badawcze tomografu wiroprowadowego przystosowanego do badania elementów osiowosymetrycznych. Przeprowadzono badania próbek z nieciągłościami wzorcowymi oraz próbki tulejowej, w której zmieniano naprężenie za pośrednictwem z wykorzystaniem pompy hydraulicznej. Wprowadzenie naprężeń rozciągających spowodowało mierzalne zmiany przenikalności magnetycznej, przy zachowaniu osiowej symetrii próbki. Na rysunkach 4.8 oraz 4.9 (za ref. 65) przedstawiono wyniki pomiarów zależności amplitudy oraz przesunięcia fazowego rejestrowanego sygnału od pozycji stalowej tulei względem cewek (wymuszającej i odbiorczej). Pytanie jakie wyniki uzyskano dla tulei miedzianej? Interesujące wydaje się też pytanie, jaki wpływ na uzyskane wyniki może mieć zmiana przewodnictwa, a wywołana zmianą grubości ścianki tulei pod wpływem przyłożonego ciśnienia? Własności sprężyste (moduł Younga oraz współczynnik Poissona) dla miedzi i stali znacznie się różnią. Czy może to dostarczyć dodatkowych informacji o ew. korekcie wyniku spowodowanej zmianą przewodnictwa elektrycznego materiału?

Dane uzyskane dla próbek z wcięciem dały bardzo klarowne wyniki dla stali (materiału o dużej podatności magnetycznej), natomiast nie dostarczają informacji o występującej nieciągłości w próbce miedzianej. Rodzi się pytanie, na ile proponowana metoda nadaje się do materiałów magnetycznych o niewielkiej przenikalności magnetycznej?

Rozdział 5 został poświęcony tomograficznemu przekształceniu prostemu. Przekształcenie proste ma na celu uzyskanie numerycznego modelu, który odtwarzałby możliwie dokładnie wyniki rzeczywistych pomiarów tomograficznych badanego obiektu. Mając taki model można w kolejnym kroku testować różne rozwiązania dla tomograficznego przekształcenia odwrotnego. Zaproponowana procedura modelowania opiera się na metodzie elementów skończonych. Wykorzystano w niej szereg autorskich skryptów bazujących na środowisku Octave. Mgr inż. Paweł Nowak wykazał się bardzo dobrym opanowaniem procedur numerycznych związanych z generowaniem siatek elementów skończonych dla różnych pozycji liniowych i kątowych badanych elementów, modelowaniem magnetodynamicznym indukcji pola magnetycznego w skończonych elementach, jak również numerycznym sumowaniem odzwierciedlającym powstawanie napięcia w cewce odbiorczej. Zadania te były realizowane z wykorzystaniem oprogramowania na licencji otwartej, co jest bardzo ważne z punktu widzenia obniżania kosztów aplikacji. Z tego powodu do dyskretyzacji modelu wykorzystał oprogramowanie na licencji otwartej Netgen (opracowane na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu).

Działanie procedury automatycznej generacji siatki elementów skończonych rozpoczyna się od znalezienia punktów o ekstremalnych współrzędnych, należących do obiektu, by następnie znaleźć położenie krawędzi obiektu. Następnie tworzona jest siatka o skończonej liczbie elementów na powierzchni obiektu, która podlega procedurze optymalizacji z wykorzystaniem funkcjonałów błędów. Rozwiązywanie równań Maxwella realizowane jest z wykorzystaniem modułu magnetodynamicznego oprogramowania ElmerFEM. Procedury te umożliwiają wyznaczenie rozkładu prądów wirowych w obiekcie, natężenia pola magnetycznego oraz dyssypacji energii (wydzielonego ciepła).

Działanie programów i zastosowanych procedur numerycznych zostało poddane procesowi walidacji z wykorzystaniem dwóch modeli posiadających rozwiązania analityczne na wartości indukcji pola magnetycznego w pewnych punktach: cewek Helmholtza oraz solenoidu. Uzyskane wyniki symulacji okazały się nie dobiegać w granicach 2% od wyników analitycznych, co potwierdza poprawność zastosowanej metody.

Kolejnym problemem podjętym w rozprawie jest zagadnienie uproszczenia modelu do możliwie małej liczby elementów, które jednak pozwala na właściwe odwzorowanie właściwości badanego obiektu, generacji oraz detekcji sygnałów. W pracy zaproponowano model tomografu składający się z czterech elementów: obiektu badanego, cewki wymuszającej, cewki detekcyjnej oraz kuli obejmującej te elementy, umożliwiającej zadawanie na jej powierzchni warunków brzegowych oraz symulowania elementów przestrzeni wokół elementów aktywnych stanowiska.

Ważnym elementem modelu tomografu był odpowiedni dobór rozmiarów elementów, który wykonano badając tomograficzne przekształcenie proste dla modelu wałka bez nieciągłości modelowej. Następnym krokiem optymalizacji tomograficznego przekształcenia prostego był dobór

liczby punktów pomiarowych, w których prowadzona była symulacja z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Zaproponowany został autorski algorytm dyskretnej optymalizacji liniowej, operujący na rzeczywistych wynikach. Uzyskane rezultaty (rys. 5.14) wskazują na bardzo dobrą zgodność interpolacji krzywą B-sklejaną z wynikami pomiarów, przy znacząco (ponad dwa rzędy wielkości) zmniejszonej liczbie punktów pomiarowych. To bardzo dobry wynik. Wadą algorytmu jest możliwość „utknięcia” w minimum lokalnym. Jest oczywiste, że zwiększenie liczby punktów, z których odtwarzany jest przebieg zwiększy jakość interpolacji, jednak może to wprowadzić dodatkowy szum pomiarowy. Przeprowadzone badania jakości interpolacji w oparciu o najmniejszą wartość wskaźnika dopasowania MSE, wykazały znaczącą poprawę jakości dopasowania przy jednoczesnym zwiększeniu liczby punktów dla pozycji liniowej i kątowej. W celu minimalizacji efektów związanych z szumem pomiarowym, zaproponowano kryterium wyboru liczby punktów pomiarowych odnoszące się do powtarzalności pomiarowej stanowiska badawczego. Kolejnym elementem procedury był dobór kryterium zbieżności solvera magnetodynamicznego na dokładność uzyskiwanych wyników i czas obliczeń. W badaniach tych wykorzystano wartość indukcji pola magnetycznego w środku układu cewek Hemholtza. Pozwoliło to zaproponować „optymalne kryterium zbieżności solvera pod kątem poprawności modelowania jak i wydajności obliczeniowej”- dalsze zaostżanie kryterium zbieżności (poniżej  $10^{-6}$ ) skutkuje jedynie wzrostem czasu obliczeń.

Przeprowadzona analiza czułości tomografu wiroprądowego wykazała, że wykorzystywany w pracy układ tomografu wiroprądowego umożliwia wykrywanie nieciągłości powierzchniowych jedynie do głębokości 8 mm od krawędzi obiektu. Zależność czułości amplitudy rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości, jednak czułość amplitudy osiąga maksimum dla częstotliwości poniżej 1 kHz. Dało to podstawę do zaproponowania „optymalnej” częstotliwości wymuszenia dla badanego tomografu wiroprądowego jako 1 kHz. Nasuwa się pytanie, jak ta optymalna wartość częstości zmieniłaby się w przypadku zmian parametrów przenikalności magnetycznej i przewodnictwa elektrycznego badanego materiału?

W ostatniej części rozdziału 5. zaprezentowane zostały wyniki tomograficznego przekształcenia prostego uzyskane dla próbki tulejowej oraz próbek z nieciągłością wzorcową. W przypadku próbki tulejowej uzyskano jakościową zgodność, jednak wartości liczbowe dla modelu i pomiaru różnią się. Oznacza to, że porównanie symulacji z wynikami pomiarów wymaga przeprowadzenia normalizacji uzyskanych danych. Pytanie na ile taka normalizacja byłaby uniwersalna dla różnych badanych obiektów?

Podobnie wyniki tomograficznego przekształcenia prostego dla próbki z nieciągłością modelową wykazują dużą zgodność kształtu z wynikami pomiarów próbek o danej geometrii, jednak również tu pojawiają się różnice ilościowe w porównaniu z danymi pomiarowymi. Widać więc, że znowu konieczna jest pewna normalizacja danych. Pytanie jednak na ile będzie ona uniwersalna dla obiektów o różnych parametrach (przenikalność, przewodnictwo, rozmiary przestrzenne).

Pomimo pewnych rozbieżności prezentowane wyniki tomograficznego przekształcenia prostego dla metody wiroprądowej zasługują na wielkie uznanie. Ich uzyskanie wymagało od mgr. inż. Pawła

Nowaka szerokiej wiedzy z zakresu fizyki, modelowania i bardzo zaawansowanych umiejętności informatycznych.

Rozdział 6 poświęcony jest propozycji tomograficznego przekształcenia odwrotnego opartego na optymalizacji dyskretnej. Przekrój poprzeczny obiektu opisany został dyskretną macierzą 16x16 elementów o wartościach „0” lub „1”, co przykładowo zobrazowano na Rys. 6.2. Następnie zastosowano autorski algorytm, minimalizujący współczynnik jakości zdefiniowany jako różnica średniokwadratowa pomiędzy wynikami przekształcenia prostego, a wynikami pomiarów. Jego przydatność do zastosowań praktycznych przetestowano badając próbkę walcową z nieciągłością wzorcową o szerokości 8 mm. Niestety jak to pokazano na rys. 6.4 oraz 6.7 zaproponowana metoda nie nadaje się do praktycznego zastosowania. Sugeruje się, że pewną poprawę, można uzyskać przyjmując inne kryterium zakończenia algorytmu. Jakie mogłoby ono być?

Znacznie lepsze rezultaty uzyskano dla przekształcenia odwrotnego z wykorzystaniem nieciągłości modelowej, co zostało opisane w rozdziale 7. Nieciągłość modelową opisano przy użyciu czterech parametrów: promienia obiektu (walca), głębokości i szerokości nieciągłości modelowej oraz jej pozycji kątovej. Do algorytmu optymalizacyjnego wprowadzono funkcje kary. W celu przetestowania metody zmniejszono liczbę dopasowywanych parametrów do dwóch – szerokości i głębokości wcięcia prostokątnego w wałku. Uzyskane wyniki (zebrane w tabeli 7.1) wykazały bardzo dobrą zgodność pomiędzy parametrami nieciągłości modelowej a rozmiarami rzeczywistymi wcięcia. W kolejnym kroku podjęto próbę wyznaczenia czterech parametrów obiektu z nieciągłością modelową. W tym celu wprowadzono ograniczenia dolne i górne dla optymalizowanych parametrów (rozmiarów) obiektu oraz ustalenia (na podstawie analizy wyników pomiarów) początkowych wartości dwóch z parametrów (promień, położenie kątovej nieciągłości). Okazuje się niestety, że zarówno wybór promienia wałka, jak też położenia kątovej nieciągłości wpływa na wyniki przekształcenia prostego. Uzyskane dane pozwalają jednak na określenie (z wykorzystaniem procedur minimalizujących) zarówno wstępnej wartości promienia jak też położenia kątovej nieciągłości. W efekcie, co warto podkreślić, uzyskane wyniki dla przekształcenia tomograficznego odwrotnego dają bardzo dobrą zgodność z rzeczywistymi parametrami próbki.

Zastosowanie tomograficznego przekształcenia odwrotnego okazało się bardzo skuteczne dla wyznaczenia przenikalności magnetycznej materiału, z którego wykonana była próbka w kształcie tulei. W tym przypadku posłużono się optymalizacją ciągłą przenikalności magnetycznej. Przyjęto realistyczne ograniczenia na wartość względnej przenikalności magnetycznej (min. 1, maks. 2000). Cieszy fakt, że uzyskane wartości względnej przenikalności magnetycznej są z dokładnością lepszą niż 2% zgodne z wartościami rzeczywistymi.

W podsumowaniu zgadzam się z mgr. inż. Pawłem Nowakiem, że zastosowane tomograficznego przekształcenia odwrotnego z optymalizacją ciągłą, potwierdza możliwość wykorzystania tomografii wiropądowej w badaniach nieniszczących. Jednak, jak to przedstawiono w rozdziale 8, zastosowanie tej metody w praktyce przemysłowej wymaga jednak szeregu zabiegów doprecyzowania parametrów badanego obiektu jak też określenia celu pomiarowego. Stanowi to znaczące ograniczenie, które

wymaga dalszych badań. Niestety są też ograniczenia wynikające z podstaw fizycznych samej metody, które wpływają na możliwość detekcji nieciągłości jedynie w wierzchniej warstwie obiektów przewodzących. Pomimo to, wydaje się, że metoda wiroprowadowa może być zastosowana w dobrze określonych warunkach produkcyjnych, jak również w jednostkowych badaniach obiektów o specjalnym znaczeniu, ze względu na ich niezawodność.

Mgr. inż. Paweł Nowak wykazał się bardzo dobrą znajomością literatury przedmiotu, o czym świadczy bogata bibliografia składająca się 113 pozycji. Są to w większości oryginalne artykuły naukowe opublikowane w specjalistycznych czasopismach naukowych i dobrze dobrane do tematyki rozprawy.

Pracę czyta się dobrze – jest praktycznie wolna od literówek. To co może budzić wątpliwość to używanie sformułowania „coś w funkcji czegoś” zamiast „zależność czegoś od czegoś” oraz używania określenia „ilość” zamiast „liczba” w odniesieniu do rzeczowników policzalnych (np. „ilość projekcji”). Nie ma to jednak większego znaczenia dla ogólnej bardzo pozytywnej oceny treści rozprawy.

W podsumowaniu, chciałbym stwierdzić, że przedstawiona do recenzji rozprawa prezentuje nowe wyniki na temat możliwości wykorzystania tomografii wiroprowadowej. Mgr inż. Paweł Nowak pokazał, że potrafi zastosować zaawansowane metody komputerowe zbierania i analizy danych pomiarowych. Potrafi zinterpretować uzyskane wyniki w oparciu o istniejące modele teoretyczne oraz uwarunkowania praktyczne. W mojej opinii jest to już dojrzały naukowiec, który może podjąć samodzielnie różne zagadnienia badawcze.

Duża część wyników wykorzystanych w rozprawie została opublikowana w czasopismach posiadających współczynnik wpływu (impact factor), a 9 z nich bezpośrednio dotyczy tomografii wiroprowadowej. Mgr inż. Paweł Nowak osiągnął indeks h równy 6, co jest bardzo dobrym wynikiem na tym etapie kariery naukowej.

W mojej opinii przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia z nadmiarem ustawowe wymagania dotyczące uzyskania stopnia doktora. Wniosuję o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Nowaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

