

Łódź, 15.09.2024r.

dr hab. inż. Ewa Korzeniewska, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 25.09.2024
nr zał.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Habeloka

**p.t. „Badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na
właściwości taśm nadprzewodnikowych”**

Recenzja została opracowana na podstawie powołania mnie na recenzenta przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej uchwałą 49/2024 w dniu 18 czerwca 2024.

1. Dane ogólne

Praca wykonana została na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej przez magistra inżyniera Krzysztofa Habeloka. Rozprawa zawiera 152 strony tekstu napisanego w języku polskim, 166 pozycji literatury cytowanej, z których 74 opublikowane zostały w przeciągu ostatniej dekady. 13 podanych pozycji literaturowych jest współautorstwa doktoranta, z czego połowa z podanych pozycji to streszczenia lub rozdziały w monografii. Wszystkie publikacje, na które powołuje się doktorant, dotyczą tematyki badawczej poruszanej w rozprawie i powołanie się na nie jest zasadne. Rozprawa zawiera 96 rysunków i wykresów oraz 17 tabel. Do pracy dołączony został dodatek dotyczący wyników porównania modeli stanu krytycznego taśm nadprzewodnikowych wykorzystywanych w pracy, porównanie modeli numerycznych dla poszczególnych taśm oraz wyniki pomiarów pola magnetycznego na skonstruowanym stanowisku pomiarowym. W pracy na pierwszych stronach znajduje się wykaz skrótów i symboli użytych w pracy, a także wykaz używanych greckich i matematycznych symboli, co ułatwia czytelnikowi zapoznanie się z dysertacją. W zakończeniu pracy znajdują się trzy załączniki. Jeden z nich to lista publikacji doktoranta, w drugim znajdują się wybrane wyniki pomiarów przedstawionych w pracy oraz w załączniku trzecim znajduje się opis metody wyznaczania niepewności pomiarowych.

2. Ocena tematu i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca dotyczy charakteryzowania taśm nadprzewodnikowych z wykorzystaniem autorskiego stanowiska pomiarowego oraz współautorskiej metody bezparametrycznej wykorzystywanej do ich modelowania. Tytuł rozprawy określa

jednoznacznie tematykę, która zaprezentowana została w pracy mgr inż. Krzysztofa Habeloka. Wiedza merytoryczna, praktyczne podejście do planowania eksperymentu oraz sposób jego realizacji stanowią bez wątpienia silną stronę rozprawy. Tematyka podjęta w dysertacji jest ważna, przyszłościowa i stanowi fragment wielu badań zarówno z obszaru elektrotechniki jak i fizyki. W mojej opinii, podjęcie tematu recenzowanej pracy doktorskiej: „Badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych” (tytuł w języku angielskim: „Studies of the effect of an external magnetic field on the properties of superconducting tapes”) jest jak najbardziej celowe i uzasadnione.

3. Teza pracy i jej cel

Pozytywnie oceniam tezę sformułowaną przez autora w rozprawie:

„Zastosowanie magnesów trwałych w układzie cylindrycznej macierzy Halbacha umożliwia opracowanie systemu do charakteryzacji kątowej taśm nadprzewodnikowych HTS do zastosowania w aplikacjach o niskim zewnętrznym polu magnetycznym.”

Teza ta wskazuje na ciekawy problem naukowy oraz na obszar zastosowań praktycznych. W celu dowiedzenia słuszności tezy, autor rozprawy zaprojektował i skonstruował stanowisko laboratoryjne wykorzystujące macierz magnesów trwałych w układzie Halbacha, a następnie wykorzystał je do określenia charakterystyk kątowych taśm nadprzewodnikowych, wykorzystując opracowaną w zespole przy udziale doktoranta metodę bezparametryczną MBP

4. Zawartość rozprawy

Praca składa się z siedmiu rozdziałów, które podzielone są na podrozdziały. Pierwszy rozdział to rozbudowany Wstęp, w którym autor przedstawia cel swojej pracy, motywację do podjęcia danej tematyki badawczej, a także tezę pracy, zakres i metodykę badań oraz opisuje strukturę pracy.

W rozdziale drugim doktorant przedstawił teorię związaną ze zjawiskiem nadprzewodnictwa. Opisał krótko historię skupiając się na kamieniach milowych, podając charakterystyczne cechy nadprzewodnictwa. W części tej opisał wybrane teorie nadprzewodnictwa, w tym teorie Londonów, Ginzburga-Landau oraz teorię BSC. W rozdziale tym doktorant przedstawił także podstawowy podział nadprzewodników na nadprzewodniki pierwszego i drugiego rodzaju, podając parametry i wykresy charakterystyczne dla obu typów.

Zjawisko nadprzewodnictwa może zachodzić w nielicznych materiałach. Z tego powodu doktorant poświęcił część swojej pracy teoretycznej na opisanie materiałów nadprzewodnikowych, przedstawiając datę odkrycia związków posiadających właściwości nadprzewodnikowe. Ponadto omówił zarówno materiały niskotemperaturowe, jak i wysokotemperaturowe, wykorzystywane w jego dalszych badaniach. Ze względu na właściwości tych materiałów opisał także ich właściwości anizotropowe oraz parametry krytyczne tak jak temperatura krytyczna, natężenie pola magnetycznego oraz gęstość prądu

krytycznego. W kolejnym rozdziale pracy doktorant skupił się na modelowaniu właściwości nadprzewodników. Przedstawił w pracy rozdział zatytułowany "Model stanu krytycznego" opisując w skróconej formie model stanu krytycznego wg Beana, jako podstawowy model opisujący stan krytyczny nadprzewodnika oraz prawo potęgowe E-J, które powszechnie jest wykorzystywane do modelowania nieliniowego zachowania nadprzewodników. Zabrakło jednak w tym rozdziale innych, bardziej zaawansowanych modeli magnesowania nadprzewodnika, dokładniejszych i bardziej zbliżonych do opisu nadprzewodników wysokotemperaturowych. Model Beana opisuje zachowanie nadprzewodnika jednorodnego, podczas gdy nadprzewodniki wysokotemperaturowe mają budowę ziarnistą. Należałoby przynajmniej w sposób tabelaryczny podać i w skróconej formie opisać inne modele stanu krytycznego spotykane w literaturze.

W rozdziale drugim doktorant przedstawił zagadnienia związane z zastosowaniem nadprzewodników wysokotemperaturowych ze szczególnym uwzględnieniem kabli nadprzewodnikowych, podając nie tylko przykłady zastosowań, lecz także parametry techniczne wykorzystanych materiałów nadprzewodnikowych. Opisał zastosowanie nadprzewodników w kluczowych aplikacjach przemysłowych w branży elektrotechniki takich jak silnikach, generatorach i transformatorach, a także nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu i systemach transportowych.

Rozdział trzeci pracy jest poświęcony wysokotemperaturowym taśmom nadprzewodnikowym oraz podziałowi taśm ze względu na sposób ich produkcji. W części tej brakuje zestawienia tabelarycznego wskazującego metody produkcji oraz właściwości taśm, pomimo tego, że w kolejnym podrozdziale doktorant dokonał przeglądu metod produkcji taśm nadprzewodnikowych wysokotemperaturowych porównując techniki produkcji taśm warstwowych.

W rozdziale trzecim można znaleźć również informacje związane z zależnościami kątowymi wartości prądu krytycznego dla wybranych taśm nadprzewodnikowych. Jest to jeden z kluczowych parametrów ograniczających wykorzystywanie taśm HTS. Zależność wpływu kąta ustawienia materiałów nadprzewodnikowych w stosunku do kierunku i zwrotu wektora natężenia zewnętrznego pola magnetycznego jest zjawiskiem złożonym, a spotykane na rynku taśmy HTS mają odmienne charakterystyki określające tę zależność. W rozdziale tym znajduje się opis taśm sześciu różnych producentów takich jak American Superconductor, Shanghai Superconductor, SuNAM, SuperOx, SuperPower Advanced Pinning oraz THEVA. W tej części pracy doktorant zwraca uwagę na zależność prądu krytycznego w funkcji przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego uwzględniając modele zawierające inny zapis matematyczny wpływu anizotropii taśm HTS takie jak Kim-like Model, Magneto-Angular Anisotropy Model, Percolation Model.

Rozdziały 4-6 to opis części doświadczalnej. W rozdziale czwartym autor pracy przedstawia założenia i opis autorskiej metody bezparametrycznej służącej do wyznaczania modeli numerycznych gęstości prądów. Doktorant jest współautorem opisywanej metody powstałej przy współpracy z Instytutem Fizyki Technicznej Karlsruhe Institute of Technology. W rozdziale tym autor podał podstawowe założenia opisywanej metody, przedstawił obszar,

w którym metoda może być używana oraz dokonał opisu algorytmu jej działania. W dalszej części przedstawił istotę proponowanej metody opisując ją jako metodę polegającą na porównaniu danych pomiarowych z modelem gęstości prądu krytycznego i iteracyjnej zmianie wartości zadanych parametrów. Iteracyjność ma na celu dopasowanie się modelu do pozyskanych danych pomiarowych. W metodzie tej, w pierwszym kroku należy pobrać dane eksperymentalne w postaci danych zawierających zależność kątową prądów krytycznych w funkcji wartości indukcji magnetycznej oraz kąta θ ustawienia materiału względem zewnętrznego pola magnetycznego dla taśmy wysokotemperaturowej. Na dalszym etapie stosowania opracowanej i opisywanej metody dochodzi do uniezależnienia uzyskanej eksperymentalnej wartości prądu krytycznego od przekroju poprzecznego nadprzewodnika. Kolejny etap to wyznaczenie wartości gęstości prądu dla wartości natężenia przyłożonego pola magnetycznego i kąta θ w programie symulacyjnym, a następnie porównanie wartości zmierzonej i obliczonej. Dąży się do osiągnięcia zgodności między nimi. Według autora pracy, jeśli błąd jest nieakceptowalny dochodzi do kolejnej iteracji. W pracy pojawia się zapis „błąd wygładzony” — proszę doktoranta o rozszerzenie tego zapisu i wyjaśnienie pojęcia „wygładzony błąd”, oraz o wyjaśnienie co według doktoranta oznacza „akceptowalny błąd” lub „błąd wystarczająco mały”.

W pracy doktorant przedstawił zastosowanie metody bezparametrycznej w symulacji rozkładu pola magnetycznego wewnątrz wkładki magnezu REBCO, która umożliwiła dokładniejsze zamodelowanie wpływu prądu ekranowania na rozkład pola magnetycznego celem uzyskania pola magnetycznego o wartości indukcji 30 T. Doktorant wskazuje na możliwość wykorzystania opracowanej metody do analizy wpływu anizotropii materiału nadprzewodnikowego na redukcję strat zmiennoprądowych w cewkach, czy też transformatorach wysokoczęstotliwościowych.

Rozdział 5 poświęcony jest opisowi skonstruowanemu przez doktoranta stanowiska do charakteryzacji taśm nadprzewodnikowych. Na początku tego rozdziału doktorant opisuje metody charakteryzacji taśmy nadprzewodnikowych spotykane na świecie. W dalszej części rozdziału podaje założenia szczegółowe związane ze skonstruowanym stanowiskiem pomiarowym, w którym możliwe będzie wytworzenie jednorodnego pola magnetycznego. Autor zwraca uwagę na uzyskaną na stanowisku możliwość zmiany wartości indukcji jednorodnego pola magnetycznego w sposób skokowy oraz możliwość zmiany kierunku pola magnetycznego względem powierzchni taśmy. Do zbudowania stanowiska doktorant wykorzystał druk 3D jako metodę szybkiego prototypowania oraz sześciennie magnesy neodymowe Nd₂Fe₁₄B ułożone w cylindryczną macierz Halbacha ustawione w konkretnych pozycjach jako źródła pola magnetycznego zapewniające uzyskanie stabilnych i precyzyjnych warunków pomiarowych. W układzie zaproponowanym przez doktoranta możliwe jest zbadanie taśm nadprzewodnikowych o długości do 10 cm. W rozdziale tym doktorant opisuje modelowanie rozkładu pola w nadprzewodniku wykorzystując środowisko Matlab.

W dalszej części rozprawy doktorant przedstawia początkowe założenia konstrukcyjne projektu stanowiska badawczego oraz przedstawia etapy jego realizacji.

Pomiary pola magnetycznego przeprowadzone na zaprojektowanym przez doktoranta stanowisku do charakteryzacji taśmy nadprzewodnikowych wykonane zostały dla trzech różnych średnic maksymalnego rozstawu magnesów w macierzy Halbacha.

Czy konstrukcja z większą liczbą magnesów pozwoliłaby na dokładniejsze weryfikacje wartości pola magnetycznego i czy zasadne jest zwiększanie liczby magnesów?

Na rysunku 5.15 wykreślono zależność wartości indukcji pola magnetycznego w funkcji dystansu magnesów znajdujących się w macierzy Halbacha od jej środka. Na wykresie zaznaczone są trzy punkty pomiarowe, na podstawie których wykreślono krzywe. Z czego wynika tak niewielka liczba danych pomiarowych choćby wynikających z symulacji komputerowej?. Wykreślenie krzywej i określenie jej kształtu na podstawie tak niewielkiej liczby punktów pomiarowych obarczone jest dużym błędem. W pracy znajduje się informacja, że w celu wyznaczenia kątowej zależności wartości indukcji pola magnetycznego dla poszczególnych układów Halbacha zastosowano czujnik Halla. Brak jednak jest danych zastosowanego czujnika.

Na opracowanym stanowisku do charakteryzacji taśm HTS doktorant badał taśmy pierwszej i drugiej generacji stosując metodę czterozaciskową. Badania prowadzone były z wykorzystaniem zasilacza wydajności prądowej 200 A oraz nanowoltomierza o wysokiej dokładności. Pomiary zależności kątowej były realizowane ze skokiem co 15° , co w porównaniu z charakterystykami przedstawionymi w rozdziale 4.3 i 4.4 wydaje się skokiem zbyt mało dokładnym. Czy możliwe zatem jest zwiększenie dokładności pomiarów i zwiększenie skoku?

Doktorant uzyskał charakterystyki gęstości prądu krytycznego w funkcji kąta dla dwóch rodzajów taśmy: AMSC oraz SuperOx. Podobne charakterystyki przedstawiono w rozdziale 3.3.1 oraz 3.3.4. Pewną wskazówką do ulepszenia pracy byłoby zestawienie otrzymanych wyników na stanowisku do charakteryzacji taśm z przedstawionymi charakterystykami podanymi przez producentów taśmy. Wartością dodaną byłoby także porównanie dwóch badanych taśm na jednym wykresie.

W rozdziale piątym pojawia się również podrozdział dotyczący zastosowanych usprawnień w stanowisku do charakteryzacji taśmy, które polegały na zamianie przekładni zębatej na przekładnię ślimakową ze względu na większą rozdzielczość kątową, oraz na wymianie łożysk na łożyska ślizgowe umocowane w dolnej części konstrukcji. W ramach usprawnień pomiarowych został zastosowany półautomatyczny system pomiaru prądu krytycznego polegający na manualnym wymuszaniu prądu transportu taśm nadprzewodnikowych, natomiast proces wyznaczania wartości krytycznych prądu dla konkretnych kątów został zautomatyzowany poprzez zastosowanie kamery internetowej z systemem OCR wykorzystywanym do przetwarzania obrazów. Zaproponowane stanowisko do charakteryzacji taśmy HDS spełniło postawione przed nim wymogi.

W rozdziale 6 doktorant opisuje proces charakteryzowania taśm nadprzewodnikowych znajdujących się w jednorodnym polu magnetycznym. Wykorzystał do tego celu zaprojektowane i opisane przez siebie w rozdziale piątym stanowisko pomiarowe oraz opisaną w rozdziale czwartym metodę bezparametryczną. Badania przeprowadził dla

czterech taśm nadprzewodnikowych dwóch producentów, których parametry przedstawił na początku rozdziału. W kolejnym etapie doktorant przedstawił wyniki pomiarów zależności kątowej taśmy nadprzewodnikowych dla wybranych i opisanych taśm nadprzewodnikowych. Porównał zarówno wartości prądów krytycznych jak i wykładniki potęgowe.

Na końcu rozdziału doktorant podaje modele 3D i 2D gęstości prądu w taśmach HTS oraz przedstawia wyniki działania metody bezparametrycznej dla wybranych taśm. Porównuje poszczególne taśmy pod kątem redukcji wartości prądów krytycznych w zależności od kąta ustawienia taśmy względem wektora natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. Następnie przeprowadza dyskusję uzyskanych wyników.

Konkludując doktorant podaje, że spośród badanych taśm nadprzewodnikowych najlepszymi właściwościami cechuje się taśma SCS 4050 API. Brakuje jednak bardziej szczegółowego uzasadnienia takiego wniosku.

Rozdział siódmy, ostatni, zawiera podsumowanie i wnioski. Znajdują się tam wnioski końcowe oraz wymienione zostały kluczowe osiągnięcia wynikające z prowadzonych prac badawczych. Do nich należy opracowanie stanowiska pomiarowego do charakteryzacji taśm nadprzewodnikowych, współudział w opracowaniu metody bezparametrycznej, opracowanie modelu numerycznego magnetostaticznej analizy w środowisku ANSYS, przeprowadzenie pomiarów wartości prądów krytycznych w jednorodnym polu magnetycznym oraz przeprowadzenie badań porównawczych dla czterech taśm nadprzewodnikowych. Dodatkowo autorskim rozwiązaniem jest opracowanie systemu akwizycji danych pomiarowych bazujących na OCR oraz opracowanie i przetestowanie trzech modeli numerycznych Kim-tanh, Kim-cosh oraz Kim-cosh-power.

Na zakończenie dysertacji autor wskazuje przyszłe kierunki badań.

5. Ocena ogólna rozprawy

Rozprawa dotyczy istotnego zagadnienia, a mianowicie wyznaczania gęstości prądu krytycznego nadprzewodników masywnych oraz określania wpływu kąta ustawienia taśm HTS w stosunku do wektora pola magnetycznego na gęstość prądu transportu. Doktorant w pracy posługuje się współczesnymi metodami badawczymi. Prace rozpoczął od studiów literaturowych, etapu projektowania stanowiska badawczego i przechodząc przez etap wykonawczy, na końcu opisał metodę bezparametryczną charakteryzowania taśm nadprzewodnikowych, a następnie porównał dane eksperymentalne z pozyskanymi z badań modelowych. Wyniki badań przedstawione są zarówno w sposób graficzny jak i opisowy wraz z dyskusją, co stanowi zamknięty cykl badawczy.

Oprócz kwestii zasadniczych, przedstawionych na wcześniejszym etapie recenzji, mam kilka pytań do doktoranta:

1. W pracy, doktorant opisując modele stanu krytycznego i dodatkowo powołuje się na algorytm nietoperzowy. Proszę o sprecyzowanie i podanie założeń tego algorytmu w odniesieniu do nadprzewodników.

2. W podsumowaniu rozdziału 3 doktorant stwierdza: „Na podstawie zestawionych danych oraz charakterystyk kątowych można stwierdzić, iż dla zależności odbiegających od standardowych opisów eliptycznych lepsze są modele hiperboliczne.”. Ze względu na zbyt ogólne stwierdzenie proszę doktoranta o rozwinięcie tego zapisu.
3. W pracy pojawiają się dwa środowiska symulacyjne MATLAB i ANSYS. Znaleźć można także wyniki pozyskane z COMSOL-a. Które z tych środowisk doktorant poleca do badań symulacyjnych i dlaczego? Dlaczego badania są robione w dwóch różnych programach symulacyjnych, a nie w jednym?
4. Który z modeli 3D czy 2D w przypadku wizualizacji zależności kątowej ma większe walory użytkowe w przypadku modelowania?
5. Co doktorant miał na myśli zapisując na stronie 120 cyt: „można podwyższyć wykorzystanie taśmy do 50% I_c ”?
6. Czy macierz Halbacha mogłaby być zastąpiona innym rozkładem magnesów? Jakie alternatywne propozycje do macierzy Halbacha wykorzystywanej do wytworzenia jednorodnego pola magnetycznego zewnętrznego miałby doktorant?
7. We wnioskach doktorant stwierdza, że zaproponowane metody i modele w łatwy sposób można wykorzystać w symulacjach numerycznych niestety tylko jednej taśmy. Czy doktorant ma propozycję rozwoju swojej pracy w taki sposób, aby można było rozwiązanie zastosować nie tylko dla jednej taśmy?

Zamieszczone powyżej uwagi, komentarze i pytania mają w większości charakter dyskusyjny i w żaden sposób nie przekreślają pozytywnej oceny rozprawy. Jestem przekonana, że Autor poszerzył w swoich badaniach obszar wiedzy, związany ze zjawiskiem nadprzewodnictwa, a także rozwinął swoje kompetencje w zakresie modelowania zjawisk fizycznych. W obszarze technicznym pokazał, że potrafi projektować układy badawcze jak i pomiarowe oraz przeprowadzać badania symulacyjne umożliwiające oszacowanie wartości niemierzalnych w procesie eksperymentu.

6. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Oprócz uwag o charakterze bardziej ogólnym mam też uwagi, które uważam za mniej istotne. Są to błędy edytorskie, które zapewne są wynikiem wielokrotnej iteracji pracy, aż do momentu powstania opracowania końcowego. Przykładowo:

Pojawiają się niezręczności językowe:

- Na stronie 79 jest napisane „...uzyskany model numeryczny przedstawiono na Rys. 4.9a”;
- Na rysunku 5.24b jest zapis: „...fizyczna realizacja układów Halbacha”;

- W tezie pracy a także na str. 110 i 112 zapis „...niskie pole magnetyczne” zamiast dla małych wartości indukcji lub natężenia pola magnetycznego;
- W pracy znajdują się skróty myślowe takie jak na przykład strona 115: „wraz ze zwiększaniem się By”;
- Na str. 117 „...wartość prądu krytycznego jest bardziej jednorodna na charakterystyce kątovej...”. Co to znaczy że wartość jest bardziej jednorodna?
- Zapisane zdanie: „wartość prądu krytycznego jest bardziej jednorodna na charakterystyce kątovej” zawiera niestosowne określenie dotyczące jednorodności a dalszy zapis: „Minima lokalne są przesunięte w kierunku $\theta = 150^\circ$ ” jest nieprecyzyjny;
- Na rysunku 6.10 d brak jest opisu osi pionowej.

7. Wniosek końcowy

W podsumowaniu mojej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Krzysztofa Habeloka pt: *„Badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych”* stanowiąca samodzielne rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego, wykazała, iż doktorant posiadał cechy badacza, pozwalające na prowadzenie samodzielnej pracy naukowej w dyscyplinie: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Stwierdzam, że przedłożona mi do zaopiniowania praca doktorska, nie wymaga uzupełnień ani poprawek i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, które zostały określone w artykuł 187 ust 1 i ust 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 pozycja 1668 z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Habeloka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej.

