Politechnika Łódzka
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki

Łódź, 25.01.2022

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

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Laska p.t. „Analysis and examination of selected methods of pulsed-field magnetization of high-temperature superconductors"

Recenzja została opracowana na podstawie umowy o dzieło nr UMC/4328/2021 pomiędzy Politechniką Śląską jako zamawiającym oraz wykonawcą Ewą Korzeniewską.

1. Dane ogólne

Praca wykonana została na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej przez magistra inżyniera Pawła Laska. Doktorant stopień magistra na kierunku elektrotechnika uzyskał 5 października 2016 r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej i zgodnie z przekazaną dokumentacją nie ubiegał się dotychczas o nadanie stopnia doktora. Doktorant ma siedmioletnie doświadczenie w pracy w przemyśle na różnych stanowiskach pracy. Od 1 marca 2021 pracuje na stanowisku asystenta w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, natomiast wcześniej od 2016 był doktorantem na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej.

Rozprawa napisana w języku angielskim zawiera 163 stron tekstu, 272 pozycji literatury cytowanej, z których 151 opublikowane zostały w przeciągu ostatniej dekady, a 23 pozycji to materiały dostępne na stronach internetowych. 4 podane pozycje literaturowe są współautorstwa doktoranta. Wszystkie publikacje, na które powołuje się doktorant, dotyczą tematyki badawczej poruszanej w rozprawie i powołanie się na nie jest zasadne. Rozprawa zawiera 67 rysunków i wykresów oraz 2 tabele. Do pracy dołączony został dodatek dotyczący czujników pola magnetycznego. 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.

2. Ocena tematu i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca dotyczy analizy magnesowania nadprzewodników wysokotemperaturowych polem impulsowym, z wykorzystaniem krótkich impulsów prądu generowanych przez magnes nadprzewodnikowy z układem pompowania strumienia magnetycznego RLC, ze szczególnym uwzględnieniem opisu przebiegów prądu i pola magnetycznego przez nią generowanych. Tytuł rozprawy określa jednoznacznie jej tematykę, która zaprezentowana została w pracy p. mgr inż. Pawła Laska. Wiedza merytoryczna, praktyczne podejście do planowania eksperymentu oraz sposób jego realizacji jest bez wątpienia silną stroną rozprawy. Tematyka podjęta w dysertacji jest ważna, przyszłościowa i stanowi fragment wielu badań zarówno z obszaru elektrotechniki jak i fizyki. Zatem podjęcie tematu recenzowanej pracy doktorskiej pod tytułem: „Analysis and examination of selected methods of pulsed-field magnetization of high-temperature superconductors" (tytuł w języku polskim: „Analiza i badania wybranych metod magnesowania nadprzewodników wysokotemperaturowych") jest jak najbardziej celowe i uzasadnione.

3. Teza pracy i jej cel

Pozytywnie oceniam tezy sformułowane przez autora w rozprawie:
„Wpływ parametrów obwodu, a zwłaszcza indukcyjności cewki układu pompowania strumienia magnetycznego przeznaczonej do magnesowania nadprzewodników z wykorzystaniem impulsowego pola na spułapkowane pole magnetyczne. Skuteczność magnesowania impulsowym polem wysokotemperaturowych materiałów nadprzewodzących w temperaturze 77 K można zwiększyć zarówno przez szczytowe pole magnetyczne, jak i jego gradient w czasie."
Tezy te wskazują na ciekawy problem naukowy oraz wskazują również na obszar zastosowań praktycznych. W celu dowiedzenia słuszności tez autor rozprawy zaprojektował magnes nadprzewodnikowy z układem pompowania strumienia magnetycznego z uwzględnieniem różnych parametrów elektrycznych elementów składowych oraz różnych średnic drutu wykorzystywanego do zbudowania cewki oraz analizę porównawczą wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych zaprojektowanego układu. Z tego powodu wyznaczył sobie do opracowania zagadnienia związane z opracowaniem modelu numerycznego magnesu nadprzewodnikowego z układem pompowania strumienia magnetycznego, zbudowaniem modelu fizycznego oraz pomiarami wartości natężenia pola magnetycznego na powierzchni nadprzewodnika masywnego a także zmian pola w stanach przejściowych i w stanie ustalonym.

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 tezy pracy i skrócony opis przeglądu literaturowego dotyczącego zjawiska magnesowania z wykorzystaniem impulsowego pola magnetycznego ze szczególnym uwzględnieniem materiałów nadprzewodnikowych. Drugi rozdział poświęcony jest opisowi podstawowych parametrów nadprzewodników oraz ich zastosowaniu. Opisane zostały podstawowe cechy oraz parametry krytyczne nadprzewodników, podane zostały diagramy fazowe oraz straty występujące w materiałach nadprzewodnikowych. Część rozdziału poświęcona jest także modelowi Beana jako podstawowemu modelowi opisującemu stan

krytyczny nadprzewodnika. Zabrakło 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.

Autor podał także w sposób stabelaryzowany parametry wybranych materiałów nadprzewodnikowych. W rozdziale tym autor przedstawił możliwe aplikacje nadprzewodników zarówno I jak i II rodzaju, co wskazuje na możliwości wykorzystania uzyskanych wyników, Ze względu na tematykę przeprowadzonych badań, trzeci rozdział choć również dotyczy zagadnień teoretycznych, został przez autora wyodrębniony i poświęcony zjawisku magnesowania nadprzewodników. W tej części doktorant porównuje metody magnesowania podając ich wady i zalety. Analizując metody magnesowania nadprzewodników, autor uzasadnia konieczność prowadzenia badań dotyczących impulsowego sposobu ich magnesowania. Wskazuje także na ekonomię stosowanych rozwiązań.

Rozdziały 4-6 to opis części doświadczalnej. W rozdziale czwartym autor pracy przedstawia założenia i opis modelu matematycznego obwodu elektrycznego układu pompowania strumienia magnetycznego z przeznaczeniem do magnesowania nadprzewodnika wysokotemperaturowego. Z wykorzystaniem modelu możliwa jest analiza wpływu parametrów obwodu RLC na przebiegi prądów w projektowanym obwodzie. Analiza uzyskanych wyników pozwala na dobór elementów układu pompującego strumień magnetyczny. Według wniosków wyciągniętych przez autora wartość indukcji pola magnetycznego zależy głównie od pojemności układu oraz napięcia baterii kondensatorów wykorzystywanych w konstrukcji badanego układu, w niewielkim zaś stopniu od liczby zwojów cewki, której indukcyjność wpływa według autora przede wszystkim na tempo zmian prądu. W pracy opisano proces projektowania cewki o zadanych parametrach wykorzystywanej przy konstruowaniu układu pompowania strumienia magnetycznego. Wykorzystując opracowaną procedurę autor zaproponował rozwiązania konstrukcyjne w początkowym etapie badań dwóch, a po przeprowadzeniu wstępnych badań, dodatkowej trzeciej cewki do weryfikacji wpływu szybkości zmian prądu na indukcję magnetyczną pola uwięzionego w masywnym nadprzewodniku.

Wykorzystywane w eksperymencie cewki pozwalają na wytworzenie pola o wartości indukcji rzędu 2 T przy napięciu zasilającym 300 V. Z modelowania matematycznego autor wysnuł wniosek, iż większość strat mocy układu jest generowana w cewce, a ich wartość w szczycie wynosi 16 kW. 15% tych strat to straty mocy w czasie impulsu, trwającego kilka milisekund. Ze względu na czas trwania impulsu oraz środowisko w jakim się cewka znajduje, temperatura cewki nie zmienia się. Autor słusznie upatruje również źródeł ciepła w innych komponentach układu pompowania, jednakże wskazuje, że bardzo krótki czas trwania impulsu oraz chłodzenie ciekłym azotem powinno zbilansować dodatkowo wygenerowane ciepło. Pisząc ten rozdział autor pokazał, że

dobrze opanował aparat matematyczny i jest w stanie go zastosować do opisu zjawisk fizycznych występujących w nadprzewodnikach.

W kolejnym rozdziale rozprawy autor przedstawił wyniki przeprowadzonych eksperymentów dotyczących magnesowania impulsowym polem materiałów nadprzewodnikowych z wykorzystaniem zaprojektowanego i opisanego w rozdziale czwartym układu RLC pompującego strumień magnetyczny, uwzględniając różne konfiguracje. W rozdziale tym, autor umieścił opis metodyki pomiarów i konfiguracji systemu, a także wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych, wśród których znajdują się przebiegi gęstości strumienia magnetycznego i prądu w stanie nieustalonym, rozkład gęstości strumienia magnetycznego na powierzchni nadprzewodnika wykorzystywanego do badań z uwzględnieniem szczytowej wartości indukcji przyłożonego pola oraz spułapkowanego pola odczytanego z wykorzystaniem czujników umieszczonych na powierzchni masywnego nadprzewodnika. Analiza wyników dotyczy także szybkości zmian zewnętrznego pola magnetycznego i wpływu tej szybkości na wartość indukcji uwięzionego pola magnetycznego. W pracy autor zaprezentował wyniki dla różnych wartości parametrów elementów składowych układu RLC pompującego strumień magnetyczny. Przeprowadził dyskusje doboru elementów układu na wartości pola magnetycznego spułapkowanego we wnętrzu nadprzewodnika, dowodząc przy tym tezę postawioną w pracy. W tej części pracy autor analizuje wpływ zmian parametrów elektrycznych, a także niektórych wymiarów geometrycznych na wartość indukcji pola magnetycznego uwięzionego we wnętrzu masywnego nadprzewodnika, jednakże brakuje tu analizy korelacji pomiędzy zmiennymi, a wartością wyjściową indukcji pola w nadprzewodniku. Przedstawione wartości mają charakter dyskretny. W przyszłości warto pokusić się o przeprowadzenie takiej analizy, celem optymalizacji zmiennej wyjściowej. W tej części pracy brakuje zbiorczego zestawienia uzyskanych wyników, co ułatwiłoby to czytelnikowi ich analizę. W rozdziale tym np. na rys. 5.9 oraz 5.10 występują ujemne wartości gęstości strumienia magnetycznego pomierzonego przez sensor B7, brak jest interpretacji tych wyników w pracy.

Po opracowaniu modelu matematycznego i jego weryfikacji doświadczalnej, autor przystąpił w rozdziale szóstym do modelowania zjawisk występujących w nadprzewodniku poddanemu magnesowniu z wykorzystaniem pakietu FeniCS typu open source, dedykowanego między innymi do rozwiązywania problemów polowych. W pierwszej części tego rozdziału autor przedstawia reguły i prawa fizyki związane z poruszaną tematyką, definiuje problem, który został zaimplementowany do symulacji z wykorzystaniem metody elementów skończonych wykorzystując uproszczony model osiowo-symetryczny 2D. Duża część tego fragmentu pracy mogłaby być pominięta, bowiem zarówno modele matematyczne, służące do rozwiązania równań Maxwella (potencjały wektorowe **A** i **T**), jak i metoda elementów skończonych są podstawą wykładów z teorii pola elektromagnetycznego na wydziałach elektrycznych politechnik i dogłębnie opisane w rozlicznych książkach i podręcznikach akademickich (np. *The Numerical Modelling of Eddy Currents, A. Krawczyk, J.A. Tegopoulos, Clarendon Press, Oxford,*

1993). Wyniki symulacji, uzyskane poprzez rozwiązanie cząstkowych równań różniczkowych zaproponowanych w pracy, zestawione są z wynikami eksperymentalnymi. Symulacje numeryczne namagnesowania masywnego nadprzewodnika impulsowym polem magnetycznym skalibrowano porównując uzyskane w drodze symulacji wartości z wartościami strumienia magnetycznego zmierzonego przez czujniki Halla umieszczone na powierzchni próbki. Wykorzystując metodę symulacyjną autor obliczył gęstość prądu wewnątrz nadprzewodnika w stanie nieustalonym, co stanowi uzupełnienie wyników uzyskanych w drodze eksperymentu, jednakże ze względu na fakt, że występują różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych, należy domniemywać, że przedstawione w tym przypadku wyniki też obarczone są dużym błędem. Różnice w wynikach wynikać mogą z modelu wykorzystywanego do badań symulacyjnych, gdyż jest to uproszczony model dwuwymiarowy. W przyszłości należy model rozbudować dążąc do uzyskania jak najbardziej zbliżonych do eksperymentu wartości natężenia pola magnetycznego we wnętrzu nadprzewodnika.

Rozdział siódmy, ostatni, zawiera podsumowanie i wnioski. Na zakończenie dysertacji autor wskazuje na najważniejsze osiągnięcia w pracy i przyszłe kierunki badań.

5. Ocena ogólna rozprawy

Rozprawa dotyka istotnego zagadnienia, a mianowicie magnesowania nadprzewodników masywnych będących częścią składową układów stanowiących źródło silnego pola magnetycznego o wartościach natężenia pola magnetycznego wyższych niż wytwarzane przez magnesy trwałe. Autor w pracy posługuje się współczesnymi metodami badawczymi, prace rozpoczął od studiów literaturowych, etapu projektowania i przechodząc przez etap wykonawczy i doświadczalny na końcu przeprowadził badania symulacyjne. Wyniki badań przedstawione są zarówno w sposób graficzny jak i opisowy wraz z dyskusją, co stanowi zamknięty cykl badawczy. W moim przekonaniu, badania w tym zakresie mogą przyczynić się do opracowania systemów umożliwiających uzyskanie jeszcze silniejszych źródeł pola magnetycznego, które znajdą zastosowanie w przemyśle. Przykładowo opracowany układ RLC pompujący strumień magnetyczny o różnych parametrach, opisany w niniejszej pracy może znaleźć zastosowanie jako część obwodu wzbudzenia wysokosprawnych maszyn elektrycznych o dużej gęstości mocy do napędzania samolotów lub przy odnawialnych źródeł energii.

Oprócz kwestii zasadniczych, przedstawionych wyżej, mam kilka pytań do doktoranta:

1. Co było powodem wybrania oprogramowania FEniCS do symulacji? Czy inne pakiety symulacyjne takie jak Ansys, COMSOL Multiphysics, Femlab czy Matlab miałyby tu również zastosowanie?
2. Czy na podstawie przeprowadzonych doświadczeń i symulacji możliwe jest ustalenie optymalnych parametrów elektrycznych podzespołów wykorzystywanych do budowy układu pompującego strumień magnetyczny oraz optymalnej średnicy drutu?
3. Według autora zastosowany model pozwolił na uzyskanie danych niedostępnych

lub niemierzalnych tj. rozkładu gęstości prądu wewnątrz nadprzewodnika oraz określenie strat wytworzonych wewnątrz nadprzewodnika w stanach przejściowych podczas magnesowania. W aspekcie różnic pomiędzy wartościami z badań symulacyjnych i eksperymentalnych wskazanych przy pomiarach natężenia pola na powierzchni nadprzewodnika, proszę o ustosunkowanie się do problemu błędów występujących w badaniach symulacyjnych. Jak znacząco mogą różnić się wyniki obliczeniowe rozkładu gęstości prądu wewnątrz nadprzewodnika i strat wytworzonych wewnątrz nadprzewodnika w stanach przejściowych podczas magnesowania od wartości rzeczywistych?

4. Czy autor pracy jest w stanie krótko scharakteryzować aspekt ekonomiczny wytworzenia i eksploatacji układów pompujących strumień magnetyczny zaproponowanych w pracy?
5. Jakie są możliwości aplikacyjne opracowanego układu? Jakie są ograniczenia w jego zastosowaniu?

Proszę Autora o ustosunkowanie się do postawionych pytań.
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 z urządzeniami nadprzewodnikowymi, a w obszarze technicznym pokazał, że potrafi wykorzystywać aparat matematyczny do projektowania układów elektrotechnicznych, analizować parametry układów elektrycznych i 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:

- W streszczeniu autor używa niefortunnego określenia „pompa pola" dla nazwy angielskiej „flux pump". W streszczeniu pojawiają się także błędy natury stylistycznej
- str. 32 rys. 2.7 czy też 2.10 – w opisie osi brak jest jednostek,
- rys. 2.17 – brak wskazanych części składowych przekrojów poprzecznych pokazanych na rysunku,
- rys. 2.18 składa się z kilku elementów nie opisanych ani w tekście ani pod rysunkiem,
- rys 2.25 brakuje informacji na temat temperatury w jakiej mamy do czynienia z wypychaniem pola magnetycznego z wnętrza nadprzewodnika w porównaniu do jego temperatury krytycznej.
- Rys. 5.4 – skala na osi rzędnych powinna być do 1,5 T nie do 2,5 T.
- W literaturze w przypadku powołania się na zasoby dostępne online, brak jest podania daty dostępu do źródła.

90-537 Łódź, ul. Stefanowskiego 18
tel. +48 42 631 25 02
e-mail: w2@adm.p.lodz.pl, www.p.lodz.pl, www.weeia.p.lodz.pl

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

7. Wniosek końcowy

W podsumowaniu mojej opinii stwierdzam,. że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Laska pt: *„Analysis and examination of selected methods of pulsed-field magnetization of high-temperature superconductors"* stanowiąca samodzielne rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego, wykazała, iż doktorant posiadł cechy badacza, pozwalające na prowadzenie samodzielnej pracy naukowej w dyscyplinie: automatyka elektronika i elektrotechnika.

Stwierdzam, że przedłożona mi do zaopiniowania rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Laska, nie wymaga uzupełnień ani poprawek i spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

90-537 Łódź, ul. Stefanowskiego 18
tel. +48 42 631 25 02
e-mail: w2@adm.p.lodz.pl, www.p.lodz.pl, www.weeia.p.lodz.pl

HR EXCELLENCE IN RESEARCH