



Lublin, dn. 22 lutego 2020 r.

Dr hab. inż. Michał Majka, prof. uczelni
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A
20-618 Lublin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Laska pt.:
***„Analysis and examination of selected methods of pulsed-field magnetization
of high-temperature superconductors”***

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie umowy o dzieło UMC/4349/2021 zawartej w dniu 29 grudnia 2021 r. pomiędzy Politechniką Śląską, a moją osobą. W niniejszej umowie zamawiający tj. Politechnika Śląska, powierza mojej osobie wykonanie recenzji dotyczącej spełnienia przez rozprawę doktorską mgr. inż. Pawła Laska warunków określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (tekst jednolity Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późniejszymi zmianami). Do pełnienia funkcji recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Laska zostałem wyznaczony uchwałą nr 60/2021 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej z dnia 16 listopada 2021 r. (Monitor Prawny Politechniki Śląskiej poz. 1008).

1. Przedstawienie podstawowych danych o kandydacie

Mgr inż. Paweł Lasek w latach 2011 – 2014 był studentem studiów I stopnia Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej na kierunku elektrotechnika. W 2014 uzyskał tytuł zawodowy inżyniera po obronie pracy *„Napęd przyszłości – samochód w 2025 roku”*. Praca dyplomowa została wykonana podczas stażu w Brose Fahrzeugteile GmbH w Würzburgu w Niemczech zrealizowanego pod opieką dr. inż. Jacka Junaka. Praca dyplomowa dotyczyła analizy rynku pojazdów elektrycznych i hybrydowych, alternatywnych metod magazynowania energii w pojazdach elektrycznych oraz obejmowała symulację tego typu pojazdów w różnych cyklach jazdy.

Kandydat w latach 2014 – 2016 był studentem studiów magisterskich II stopnia na kierunku elektrotechnika prowadzonych przez Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej. Stopień magistra na kierunku elektrotechnika uzyskał w dniu 5 października 2016 r. po obronie pracy magisterskiej pod tytułem *„Nowa generacja energooszczędnych silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym do zastosowań w motoryzacji”*. Podstawowym celem pracy było



zaprojektowanie i zbadanie możliwości budowy uniwersalnego silnika elektrycznego do zastosowania w pojazdach samochodowych.

W latach 2017 – 2019 ukończył studia podyplomowe „Przygotowanie pedagogiczne” w Instytucie Badań nad Edukacją i Komunikacją Politechniki Śląskiej. Od 2016 roku jest doktorantem na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Od 1 marca 2021 pracuje na stanowisku asystenta w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej.

Mgr inż. Paweł Lasek jest współautorem 8 artykułów naukowych znajdujących się w czasopismach naukowych ujętych w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2020 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami) tj. „Komunikacie Ministra Edukacji i Nauki z dnia 21 grudnia 2021 r. o zmianie i sprostowaniu komunikatu w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych”.

Mgr inż. Paweł Lasek dotychczas nie ubiegał się o nadanie stopnia doktora.

2. Przedstawienie informacji o ocenianej rozprawie doktorskiej

a) tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora

Mgr inż. Paweł Lasek jest samodzielnym autorem rozprawy doktorskiej zatytułowanej „*Analysis and examination of selected methods of pulsed-field magnetization of high-temperature superconductors*”. Tytuł rozprawy w języku polskim został sformułowany następująco: „*Analiza i badania wybranych metod magnesowania nadprzewodników wysokotemperaturowych*”. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Mariusz Stępień prof. PŚ, a promotorem pomocniczym dr inż. Janusz Hetmańczyk.

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Laska jest samodzielną pracą pisemną, wobec czego spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”.

Rozprawa doktorska została przygotowana w języku obcym – angielskim, zawiera zarówno streszczenie w języku angielskim (str. 11) oraz streszczenie w języku polskim (str. 12) w związku z czym spełniony został również warunek określony w art. 187 ust. 4 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”.

b) ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Rozprawa doktorska, napisana na 163 stronach, zawiera:

- wykaz najważniejszych oznaczeń, skrótów i symboli matematycznych (str. 5 - 7),
- streszczenie w języku angielskim i polskim (str. 11 i 12),



- 7 rozdziałów merytorycznych (w tym wstęp i podsumowanie),
- bibliografii (str. 127 - 149),
- oraz jednego załącznika A (str. 153 - 163).

Układ pracy nie budzi zastrzeżeń i jest zgodny z klasycznym dla tego rodzaju opracowań.

W rozdziale pierwszym rozprawy doktorskiej Autor szczegółowo uzasadnia cel podjęcia tematyki badawczej. Po gruntownych studiach literaturowych oraz przedstawieniu aktualnego stanu wiedzy Autor formułuje tezę oraz przedstawia obiekt badań, którym jest system magnesowania nadprzewodników wysokotemperaturowych. Trwałe namagnesowanie monolitycznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego uzyskiwane jest poprzez umieszczenie nadprzewodnika wewnątrz cewki magnesującej, ochłodzenie nadprzewodnika poniżej temperatury krytycznej T_c , a następnie wytworzenie wewnątrz cewki pola magnetycznego o dużej amplitudzie poprzez impulsowe rozładowanie baterii kondensatorów przez solenoid.

Rozdział drugi rozprawy doktorskiej zatytułowany „*Fundamentals of superconductivity*” stanowi wprowadzenie do tematyki nadprzewodnictwa. W dziewięciu podrozdziałach Autor opisuje podstawowe właściwości materiałów nadprzewodzących z naciskiem na zagadnienia związane z magnesowaniem nadprzewodników monolitycznych. W rozdziale drugim rozprawy Autor krótko przedstawił historię odkrycia nadprzewodnictwa, omówił parametry krytyczne nadprzewodników tj. temperaturę krytyczną, krytyczne natężenia pola magnetycznego oraz krytyczną gęstość prądu. Rozdział ten zawiera również opis i wykresy obrazujące zmiany namagnesowania nadprzewodników I i II rodzaju w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego, oraz zebrane w tabeli parametry wybranych materiałów nadprzewodnikowych. Oddzielny podrozdział Autor poświęca diagramom fazowym nadprzewodników, gdzie zamieszczono równania opisujące zależności łączące parametry krytyczne nadprzewodników. Równania te są następnie wykorzystywane w wykonanych modelach numerycznych przedstawionych w rozdziale 6 rozprawy. W podrozdziale „*Anisotropy*” Autor przedstawia strukturę związków Nb_3Sn , YBCO oraz BSCCO. Jest to niezwykle istotny podrozdział rozprawy doktorskiej ponieważ badania eksperymentalne opisane w rozdziale 5 zostały przeprowadzone dla krążka nadprzewodnika masywnego YBCO. Nadprzewodnik ten ma strukturę wielowarstwową i anizotropową. Konsekwencją warstwowości i anizotropii nadprzewodników wysokotemperaturowych są różne wartości gęstości prądów krytycznych w poszczególnych płaszczyznach – prądy nadprzewodzące w płaszczyźnie $a-b$ są wielokrotnie większe niż w innych kierunkach. Z tego powodu ważne jest takie ułożenie monolitycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych we wszelkich urządzeniach elektrycznych, które umożliwi powstanie w nich prądów o dużych wartościach, co prowadzi do właściwego wykorzystania materiału nadprzewodnikowego. Wspomniana anizotropia strukturalna nadprzewodników monolitycznych pociąga za sobą również silną anizotropię mechaniczną i termiczną.

W kolejnym rozdziale 2.5 Autor przedstawił podstawowe informacje na temat strat mocy występujących w nadprzewodnikach, opisał straty powstające w wyniku pełzania i płynięcia

strumienia magnetycznego (ang. flux creep i flux flow) oraz straty histerezy i wiroprądowe. W kolejnym rozdziale 2.6 przedstawia model stanu krytycznego, inaczej zwany modelem Beana. Stworzony przez Beana w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku model zakłada równowagę sił Lorentza i maksymalnych sił pinningu w nadprzewodniku. Zgodnie z modelem stanu krytycznego Beana zmiany zewnętrznego pola magnetycznego indukują w nadprzewodniku prądy o pewnej określonej gęstości J_c , zwanej gęstością krytyczną, a rozkład tych prądów jest taki, że generowane przez nie pole magnetyczne kompensuje, w pełni lub częściowo, zmiany pola wewnątrz nadprzewodnika. Model Beana zakłada, iż gęstość prądu krytycznego jest stała i niezależna od wartości pola magnetycznego w próbce nadprzewodzącej. Opis modelu stanu krytycznego Beana jest uzasadnioną częścią rozprawy doktorskiej, ponieważ był on punktem wyjścia do sformułowania wielu różnych modeli makroskopowych nadprzewodnictwa. W końcowej części rozdziału drugiego Autor wymienia i krótko opisuje zastosowania nadprzewodników I i II rodzaju w medycynie, kablach nadprzewodnikowych, nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu, transformatorach nadprzewodnikowych, nadprzewodnikowych zasobnikach energii SMES, maszynach elektrycznych, lewitacji magnetycznej oraz wykorzystanie nadprzewodników jako ekranów pola magnetycznego.

Rozdział 3 zatytułowany „*Magnetisation of superconductors*” poświęcony został opisowi metod magnesowania nadprzewodników wysokotemperaturowych pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Pierwsza część rozdziału stanowi wprowadzenie do tematyki magnesowania nadprzewodników. W dalszej części Autor wprowadził podział metod magnesowania na statyczne i dynamiczne. Opisał metodę statyczną ZFC (ang. zero field cooling) tj. ochłodzenie nadprzewodnika przy braku pola magnetycznego, metodę FC (ang. field cooling) tj. ochłodzenie nadprzewodnika w polu magnetycznym oraz dynamiczną metodę pulsacyjną PFM (ang. pulsed-field magnetisation) będącą przedmiotem badań i analiz przeprowadzonych w rozprawie doktorskiej. Ważnym elementem rozdziału trzeciego jest przegląd pomp pola magnetycznego stosowanych do aktywacji nadprzewodników wysokotemperaturowych. Autor wykonał klasyfikację pomp pola w zależności od ich konstrukcji, przeznaczenia i właściwości.

W rozdziale czwartym Autor szczegółowo przeanalizował układ elektryczny służący do wytworzenia impulsu pola magnetycznego na powierzchni nadprzewodnika. Autor na siedmiu stronach rozprawy doktorskiej przeprowadził analizę stanu nieustalonego w gałęzi szeregowej RLC przy zwarciu. Stosując metodę operatorową wyznaczył równania opisujące przebiegi prądu i napięcia w tym obwodzie. Ponadto, w zależności od doboru wartości parametrów RLC dla tego obwodu oraz wartości współczynnika tłumienia wyznaczył równania opisujące przebiegi czasowe prądu wyładowania kondensatora oraz napięcia na kondensatorze w przypadku granicznym, aperiodycznym i oscylacyjnym tłumionym. Układ impulsowego wzbudzenia pola magnetycznego do aktywacji nadprzewodników wysokotemperaturowych może być rozbudowany o rdzeń magnetyczny głównie w celu zmniejszenia strumienia rozproszenia i skoncentrowanie strumienia magnetycznego w obszarze nadprzewodnika. Również ten przypadek był przedmiotem analizy prowadzonej przez Autora w rozdziale 4.2, gdzie odnajdujemy wyprowadzone równania na indukcyjność takiego obwodu. W rozdziale 4.3 Autor przedstawia uzyskane wyniki uzyskane

z opracowanego modelu matematycznego układu tj. przebiegi prądu w analizowanym obwodzie oraz przebiegi napięcia na kondensatorze dla trzech różnych pojemności 2, 4 i 5 mF, przy założeniu stałej wartości rezystancji $R = 1 \Omega$ i początkowej wartości napięcia na kondensatorze $U_{c0} = 100 \text{ V}$. Samodzielnie opracowany przez Doktoranta model matematyczny obwodu elektrycznego pompy pola magnetycznego umożliwia analizę wpływu poszczególnych parametrów obwodu na przebieg prądu. Ponieważ wartość pola magnetycznego wewnątrz cewki magnesującej zależy od jej liczby zwojów oraz prądu płynącego przez cewkę, Doktorant przeprowadził analizę wpływu liczby zwojów cewki i pojemności baterii kondensatorów na szybkość narastania oraz szczytową wartość prądu w rozpatrywanym obwodzie. Przeprowadzona analiza wykazała, że szczytowa wartość pola magnetycznego wewnątrz cewki układu magnesującego zależy w głównej mierze od wartości pojemności obwodu i napięcia do jakiego zostanie naładowana bateria kondensatorów, mniejszy wpływ ma liczba zwojów cewki magnesującej, natomiast szybkość zmian prądu w analizowanym obwodzie zależy w największym stopniu od wartości indukcyjności cewki magnesującej. Niezwykle ważną częścią rozdziału czwartego jest opis samodzielnie opracowanej metody projektowania cewek do impulsowego magnesowania nadprzewodników oraz zaprojektowanie trzech cewek powietrznych o różnych wartościach indukcyjności.

W rozdziale piątym Autor opisuje zbudowany układ pomiarowy do impulsowego magnesowania nadprzewodników. Rozdział zawiera szczegółowy opis poszczególnych elementów wchodzących w skład układ pomiarowy, opis metody wykonywania pomiarów oraz najważniejsze wyniki. W badaniach laboratoryjnych wykorzystano krążek nadprzewodnika YBCO CSYL-28 wyprodukowany przez CAN Superconductors o średnicy 28 mm i wysokości 10 mm. Do pomiaru pola magnetycznego użyto 7 czujników hallotronowych umieszczonych na jednej z powierzchni nadprzewodnika, jeden w punkcie centralnym, 3 wzdłuż granicy sektora wzrostu kryształu oraz pod kątem 45 stopni do tej granicy. Czujniki zostały skalibrowane metodą opisaną w załączniku A dołączonym do rozprawy. Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone dla trzech cewek o różnych indukcyjnościach zaprojektowanych metoda opisaną w rozdziale czwartym. Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły skuteczne działanie zaprojektowanych cewek w układzie magnesowania nadprzewodników, a zmierzone przebiegi prądu są zgodne z wynikami przeprowadzonych symulacji. Przedstawiona w rozprawie analiza rezultatów badań eksperymentalnych pokazuje krytyczne podejście Doktoranta do otrzymanych wyników.

Kolejny szósty rozdział rozprawy doktorskiej dotyczy modelowania zjawisk elektromagnetycznych zachodzących wewnątrz monolitycznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego podczas magnesowania impulsowego. Model numeryczny został wykonany przy użyciu programów wykorzystujących metodę elementów skończonych. Autor prawidłowo definiuje geometrię modelu, prawidłowo określił i opisał warunki brzegowe. Symulacje numeryczne zostały przeprowadzone dla jednego kondensatora o pojemności $C = 5 \text{ mF}$. Przeprowadzone analizy numeryczne pozwalają zaobserwować rozkład gęstości prądu i indukcji magnetycznej wewnątrz nadprzewodnika w wybranych chwilach czasu. W analizie wyników Autor porównał między innymi wartości indukcji magnetycznej na powierzchni nadprzewodnika uzyskane w drodze symulacji z wartościami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych. Sposób



rozwiązania problemu pokazuje dobrą znajomość narzędzi symulacyjnych oraz interpretacji otrzymanych wyników.

Ostatni, siódmy rozdział jest typowym podsumowaniem oraz zestawieniem wniosków płynących ze zrealizowanych prac.

Podsumowując, w mojej opinii zarówno zawartość jak i struktura recenzowanej pracy spełnia wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim. Rozprawa doktorska została napisana jasnym, precyzyjnym i poprawnym językiem angielskim. Wykresy i rysunki są dobrej jakości, właściwie dobrane i dobrze opisane. Rozprawa zawiera jedynie drobne uchybienia w zapisie równań np. brak zastosowania kursywy dla symbolu wektora reprezentującego wielkość fizyczną, zbędne stosowanie kursywy dla zapisu symbolu operatora różniczkowania, czy też niepotrzebne pogrubianie symbolu operatora nabla. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że rozprawa doktorska wyróżnia się niezwykłą starannością redakcji.

c) ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Zastosowane w rozprawie piśmiennictwo jest następstwem wyboru przez Autora przedmiotu badań. Piśmiennictwo składa się z 272 pozycji w tym z licznych pozycji literaturowych z ostatnich kilku lat. W przypadku 4 pozycji literaturowych Doktorant występuje jako współautor. Cytowane artykuły dotyczą zagadnień związanych głównie z nadprzewodnictwem, modelowaniem numerycznym oraz pompami pola magnetycznego. Większość pozycji zawiera cyfrowe identyfikatory dokumentu elektronicznego DOI. Autor w bibliografii umieścił również kilkanaście pozycji do stron internetowych producentów oprogramowania używanego do modelowania numerycznego oraz producentów sprzętu pomiarowego. Literatura jest prawidłowo cytowana w rozprawie doktorskiej, a jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy.

Bibliografia rozprawy doktorskiej jest niezwykle obszerna, ale mogłaby być poszerzona moim zdaniem na przykład o monografię prof. Ryszarda Pałki „*Monolityczne nadprzewodniki wysokotemperaturowe. Modele makroskopowe i zastosowania*” wydaną przez Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej w 2008 r. w której Autor podsumował kilkanaście lat swojej pracy badawczej dotyczącej modelowania i zastosowania monolitycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych w maszynach elektrycznych. Wiele pozycji z bibliografii ma niewłaściwe formatowanie tytułów cytowanych publikacji. Bardzo często tytuł artykułu, z wyjątkiem pierwszej litery pierwszego wyrazu, pisany jest małymi literami. Jest to najprawdopodobniej wynik błędnej pracy używanego menadżera bibliografii.

Ocena: zastosowane piśmiennictwo jest obszerne i prawidłowe.



d) wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata

Celem pracy Doktoranta, określonym w rozdziale 1.3, jest przeprowadzenie kompleksowej, naukowej analizy układu RLC stosowanego do magnesowania pulsacyjnego monolitycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych oraz określenie wpływu poszczególnych elementów układu RLC na generowany impuls pola magnetycznego. Dla oceny rozprawy doktorskiej kluczowe znaczenie ma jej teza, bowiem wysiłek wkładany w przygotowane rozprawy doktorskiej powinien zmierzać w kierunku udowodnienia postawionej tezy lub weryfikacji trafności postawionych hipotez badawczych. Kandydat na stronie 20 rozprawy doktorskiej stawia jej tezę: **„An influence of the circuit parameters, especially coil inductance in flux pump dedicated for pulsed-field magnetisation of superconductors, have an influence on the trapped magnetic field. The effectiveness of pulsed-field magnetisation of high-temperature superconducting bulks at 77 K can be enhanced by both the peak magnetic field and its gradient over time”** w języku polskim *“Wpływ parametrów obwodu, a zwłaszcza indukcyjności cewki w pompie pola przeznaczanej do magnesowania impulsowego nadprzewodników, ma wpływ na pułapkowane pole magnetyczne. Efektywność magnesowania pulsacyjnego monolitycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych może być zwiększona zarówno przez szczytowe pole magnetyczne, jak i jego gradient w czasie”*. W mojej ocenie postawiona teza badawcza świadczy o zidentyfikowaniu problemu naukowego oraz jednoznacznie określa cel pracy Kandydata.

W mojej ocenie realizacja celów badawczych opisanych w rozprawie doktorskiej została poprzedzona dogłębными studiami Autora nad piśmiennictwem dotyczącym tego tematu, Autor szczegółowo opisał w rozprawie obiekt badań, cel prowadzonych badań został uzasadniony, a postawiona teza rozprawy doktorskiej została udowodniona. Uwzględniając powyższe uważam, że cele oraz teza pracy są właściwe i prezentują poziom odpowiedni dla rozpraw doktorskich.

e) wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Zakres badań przedstawiony w rozprawie doktorskiej jest szeroki i został szczegółowo opisany. Rozprawa może być podzielona na zasadnicze części związane z opracowaniem modelu matematycznego, badaniami laboratoryjnymi oraz badaniami symulacyjnymi. Doktorant samodzielnie opracował model matematyczny obwodu elektrycznego pompy pola magnetycznego oraz opracował metodę projektowania cewek do magnesowania, prawidłowo dobierając aparat matematyczny możliwy do zastosowania. Doktorant wykonał badania laboratoryjne modelu pompy pola przy wykorzystaniu autorskiego stanowiska badawczego w oparciu o prawidłowo dobraną aparaturę pomiarową. **W mojej opinii zaproponowane i zastosowane przez Autora narzędzia i metody badawcze można uznać za poprawne i odpowiednio dobrane do postawionego problemu naukowego.**



f) ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Zasadniczą część rozprawy stanowią rozdziały 4 – 6. Zamieszczone w nich wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych pozwalają osiągnąć ustalone cele pracy i udowodnić postawioną tezę. Uzyskane rezultaty rozszerzają znane dotychczas ustalenia w zakresie wyników badań naukowych nad metodami magnesowania nadprzewodników wysokotemperaturowych.

g) informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Tematyka rozprawy jest aktualna i istotna z punktu widzenia potencjalnych zastosowań. Najważniejszą cechą monolitycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych z punktu widzenia zastosowań inżynierskich jest zdolność przewodzenia przez nadprzewodnik znajdujący się w polu magnetycznym prądów o dużych natężeniach. Nadprzewodnik wysokotemperaturowy zaktywizowany w polu magnetycznym staje się nadprzewodzącym magnesem trwałym, a po usunięciu układu wzbudzenia można go wykorzystać jako źródło pola magnetycznego. Pomimo trudności technologicznych wielu producentom udało się opanować seryjną produkcję masywnych nadprzewodników wysokotemperaturowych o bardzo dobrych i jednakowych właściwościach, umożliwiających namagnesowanie do pól rzędu kilku tesli. Dostępność i stosunkowo niska cena monolitycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych umożliwia konstrukcję wielu różnych urządzeń elektrycznych o bardzo wysokich parametrach technicznych. Opracowana przez Doktoranta metoda projektowania cewek do impulsowego magnesowania nadprzewodników pozwala na zmniejszenie ich rozmiaru, co jest niezwykle istotne przy zastosowaniu nadprzewodników monolitycznych jako źródło pola magnetycznego w kompaktowych maszynach elektrycznych w miejsce magnesów trwałych.

h) informacja o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Wymienione przeze mnie uwagi oraz wątpliwości wyrażone w pytaniach poniżej nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej pracy doktorskiej i nie umniejszają mojej pozytywnej oceny oryginalności rozprawy. Należy je potraktować jako przejaw dużego zainteresowania tematyką badawczą, będącą przedmiotem recenzowanej rozprawy, chęcią wskazania kolejnych możliwych obszarów badawczych i dróg rozwoju badań prowadzonych przez Autora.

1. Doktorant przedstawił na rysunku 2.19 przebieg prądu zwarciovego i zmianę rezystancji w obwodzie z nadprzewodnikowym ogranicznikiem prądu. Po wystąpieniu zwarcia w zabezpieczonym obwodzie obserwujemy ograniczenie wartości prądu spowodowane skokową zmianą rezystancji ogranicznika. W mojej opinii po przekroczeniu prądu krytycznego nadprzewodnika i pojawieniu się rezystancji następuje bardzo szybkie nagrzewanie się elementów nadprzewodnikowych czego efektem jest bardzo szybki wzrost jego rezystancji. Na przedstawionym przez Autora rysunku 2.19 wartość rezystancji powinna więc zdecydowanie wzrastać wraz z upływem czasu, a nie zmniejszać swoją



- wartość. Dodatkowo dla sinusoidalnie zmiennego prądu zwarciovego wzrost wartości rezystancji nie jest liniowy w czasie jak to przedstawiono na tym rysunku.
2. W rozdziałach 2.7 i 2.8 Autor bardzo krótko i powierzchownie opisuje zastosowania nadprzewodników I i II rodzaju w różnych urządzeniach technicznych. Rozprawa doktorska dotyczy metod aktywacji monolitycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych stosowanych przede wszystkim w łożyskach nadprzewodnikowych oraz nadprzewodnikowych maszynach synchronicznych, reluktancyjnych i histerezowych. Wszystkie te urządzenia mają zaprojektowane układy aktywacyjne nadprzewodników, a generacja pola magnetycznego o dużych wartościach indukcji stwarza konieczność wprowadzenia różnych zmian konstrukcyjnych w maszynach elektrycznych. Moim zdaniem szkoda, że na omówienie tych problemów Autor nie poświęcił więcej miejsca w swojej pracy.
 3. W rozdziale trzecim Doktorant wprowadził podział metod aktywacji nadprzewodników na metody statyczne (FC i ZFC) i dynamiczne do których zaliczyć metodę pulsacyjną PFM. Moim zdaniem wprowadzony podział jest dość sztuczny. W rozdziale 3.2 Doktorant opisując metodę ZFC stwierdza, że pole magnetyczne „zapamiętane” wewnątrz struktury nadprzewodnika zależy od zmiany wartości pola magnetycznego w czasie i przestrzeni. W rozdziale 3.3 stwierdza natomiast, że metoda PFM opiera się na tej samej zasadzie co ZFC, ale nie można pominąć zmian strumienia magnetycznego w czasie. Proszę o krótkie omówienie różnic pomiędzy metodą aktywacji ZFC i PFM podczas obrony rozprawy doktorskiej.
 4. W rozdziale 4.2 Doktorant analizuje pompę pola magnetycznego z rdzeniem magnetycznym, jednak w dalszej części rozprawy, prowadzonych analizach, modelowaniu i badaniach eksperymentalnych rdzeń ten nie występuje. Nie jest do końca jasne w jakim celu Autor dokonał tej analizy i należałoby wyjaśnić jej powiązanie z uzyskanymi wynikami badań. Proszę o krótki komentarz.
 5. W rozdziale piątym Doktorant rozmieścił kilka czujników Halla na powierzchni nadprzewodnika, wzdłuż granicy sektora wzrostu kryształu oraz pod kątem 45 stopni do tej granicy. Jak wiadomo nadprzewodniki wysokotemperaturowe zawierają ziarna, granice międzyziarnowe, zbliżnienia, pory i inne niedoskonałości. Dodatkowo nadprzewodniki YBCO mają strukturę wielowarstwową i anizotropową, a anizotropia strukturalna pociąga za sobą również silną anizotropię mechaniczną i termiczną, co wymusza odpowiednie kierunkowe chłodzenie nadprzewodnika i może powodować różnego rodzaju pęknięcia. Czy Doktorant dysponował informacjami od producenta krążka nadprzewodnika YBCO o jego strukturze wewnętrznej i jego jakości? Czy badany krążek nadprzewodnika YBCO przedstawiony na rys. 5.3 jest jednodomenowy? Czy krążek nadprzewodnika YBCO był na stałe przyklejony do tulei z czujnikami pola? Jeżeli nie był trwale unieruchomiony to wydaje się, że można by również zmierzyć wartości pola magnetycznego na jego powierzchni w innych punktach, na przykład poprzez obrót krążka nadprzewodnika o określony kąt. Proszę o krótki komentarz.

6. W rozdziale 6.3 dotyczącym modelowania numerycznego (str. 115) Doktorant w równaniu (6.45) uzależnia wartość krytycznej gęstości prądu od wartości indukcji magnetycznej $J_c(B)$, odsyłając czytelnika do równania (2.10). W równaniu (2.10) krytyczna gęstość prądu zależy nie tylko od wartości indukcji magnetycznej, ale również od temperatury $J_c(B, T)$. Proszę o krótki komentarz.
7. W tabelicy 2.1 Doktorant podaje, że krytyczne wartości indukcji magnetycznej dla nadprzewodnika YBCO w temperaturze 92 K w zależności od kierunku pola magnetycznego wynoszą od 53 T do 650 T, z kolei w modelu numerycznym Doktorant zakłada (str. 116), że krytyczna wartość indukcji magnetycznej wynosi 0,25 T. Skąd wynikają tak duże rozbieżności? Być może wpływ indukcji magnetycznej na krytyczną wartość gęstości prądu dla nadprzewodnika YBCO jest niewielki. Jeżeli w modelu numerycznym uzależniono wartość gęstości prądu od indukcji magnetycznej, proszę o przedstawienie zależności $J_c(B)$ dla modelowanego nadprzewodnika YBCO. Proszę o krótki komentarz.
8. Na rysunku 6.2 przedstawiano nieliniową zależność materiału nadprzewodnikowego wynikającą z prawa potęgowego opisanego równaniem (6.36). W równaniu tym wprowadzono dodatkową wartość rezystywności $\rho_0 \leq 10^{-2} E_c/J_c$, którą Doktorant opisuje jako termicznie aktywowaną. Rozumiem, że Doktorant miał na myśli termicznie aktywowaną rezystywność pochodzącą od pełzania strumienia magnetycznego (ang. flux creep) W równaniu (6.45) ponownie Doktorant wprowadza dodatkową rezystywność, tym razem o innej wartości, $\rho_0 = E_c/J_{c0}$ odpowiadającą wg Doktoranta stratom mocy od płynięcia strumienia magnetycznego (ang. flux flow) – rozdział 2.5.1 rozprawy. Proszę o krótki komentarz.
9. W równaniu (6.45) wprowadzono wartość rezystywności ρ_0 nie podając wartości dla modelowanego przypadku. Proszę o podanie wartości.
10. Na rysunku 6.2 (zielony wykres) nieliniowa zależność rezystywności od gęstości prądu jest ograniczona z góry poprzez wprowadzenie rezystywności nadprzewodnika w stanie normalnym ρ_n . Czy Doktorant korzystał z tej zależności w modelu numerycznym?
11. Na rysunkach 6.9 i 6.10 przedstawiających wyniki modelowania numerycznego Doktorant przedstawił kolorowe mapy indukcji magnetycznej i gęstości prądu. Niestety w rozprawie nie zamieszczono wykresów 2D przedstawiających zmianę gęstości prądu wzdłuż promienia krążka YBCO, czyli w poprzek modelowanego układu. Przykładowo na rys. 6.10f znajduje się obszar rezystywny gdzie gęstość prądu prawdopodobnie przekracza $1,5 J_c$, ale nie można precyzyjnie określić wartości. Skala na mapach gęstości dla rysunków 6.9 bdf i 6.10 bdf wynosi $\pm 1,5 J_c$. Czy według Doktoranta maksymalna wartość gęstości prądu w modelu numerycznym zależy od wartości ρ_0 lub ρ_n ?



i) ocena, czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Pod względem merytorycznym tekst rozprawy przedstawia oryginalny i istotny problem naukowy, który jest rozwiązany za pomocą poprawnej metodyki i właściwej analizy wyników. W mojej ocenie, rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Laska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej. Jako recenzent rozprawy doktorskiej stwierdzam, że główne osiągnięcia Autora to:

- samodzielne opracowanie metody projektowania cewek przeznaczonych do impulsowego magnesowania nadprzewodników przy użyciu pomp pola magnetycznego,
- wyprowadzenie równań opisujących przebiegi napięcia na kondensatorze i prądu płynącego w obwodzie dla układu RLC pompy pola magnetycznego,
- zaprojektowanie i wykonanie pompy pola magnetycznego przeznaczonej do impulsowego magnesowania monolitycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych,
- wykonanie pomiarów pułapkowanego pola magnetycznego w monolitycznym wysokotemperaturowym nadprzewodniku masywnym uzyskanym przez magnesowanie pulsacyjne,
- wykonanie weryfikacji eksperymentalnej wpływu gradientu pola magnetycznego na efektywność procesu magnesowania pulsacyjnego dla trzech zaprojektowanych cewek,
- wykonanie modeli numerycznych wykorzystujących metodę elementów skończonych opisujących magnesowanie impulsowe nadprzewodników w oprogramowaniu typu open-source.

j) ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

W podsumowaniu dysertacji (rozdział 7) sformułowane są wnioski, które w całej rozciągłości znajdują potwierdzenie w bardzo szerokim zakresie prac wykonanych przez Autora. Realizacja prac badawczych i zawartość pracy, w której zostały one opisane świadczą o zaawansowanej wiedzy Autora w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Wiedza ta koresponduje z obszarem prowadzonych przez niego badań. Rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury. Postawienie tezy i rozwiązanie problemu naukowego przedstawionego w rozprawie doktorskiej świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.



3. Podsumowanie

Po szczegółowym zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr. inż. Pawła Laska „*Analysis and examination of selected methods of pulsed-field magnetization of high-temperature superconductors*” w języku polskim „*Analiza i badania wybranych metod magnesowania nadprzewodników wysokotemperaturowych*” stwierdzam, że spełnia ona wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „*Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*” (Dz. U. z 2020 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

Stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata mgr inż. Pawła Laska w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej (art. 187 ust. 1 ustawy „*Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*” z dnia 20 lipca 2018 r.).

Ponadto stwierdzam, że przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Laska pod tytułem: „*Analysis and examination of selected methods of pulsed-field magnetization of high-temperature superconductors*” jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego mieszającego się w obszarze dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika (art. 187 ust. 2 ustawy „*Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*” z dnia 20 lipca 2018 r.).

Stwierdzam również, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest samodzielną pracą pisemną przygotowaną w języku obcym (angielskim), która zawiera streszczenie w języku polskim (art. 187 ust. 3 i 4 ustawy „*Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*” z dnia 20 lipca 2018 r.).

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Laska do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.