

Lublin, 12.11.2024 r.

Dr hab. inż. Paweł Surdacki,  
prof. uczelni  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Politechniki Lubelskiej  
ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin  
[p.surdacki@pollub.pl](mailto:p.surdacki@pollub.pl)

## RECENZJA

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Habeloka pt. „Badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych”

Promotor: dr hab. inż. Mariusz Stępień, prof. Politechniki Śląskiej

#### Podstawa formalna recenzji

Podstawą prawną opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Habeloka jest uchwała nr 49/2024 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 18.06.2024 r. oraz pismo Przewodniczącej ww. Rady Pani prof. dr hab. inż. Moniki Kwoki z dnia 25.07.2024 r.

#### Ocena strony formalnej rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku polskim. Ma ona prawidłową strukturę i składa się ze spisu treści, wykazu symboli łacińskich i greckich oraz akronimów, streszczenia po polsku i angielsku oraz z 7 numerowanych rozdziałów obejmujących wstęp, rozdziały merytoryczne i podsumowanie, a także bibliografię obejmującą 166 pozycji, w przeważającej większości w języku angielskim, w tym 9 pozycji w języku polskim oraz 4 załączniki zawierające listę publikacji Autora, wybrane wyniki pomiarów, opis metody wyznaczania niepewności pomiarowej i kod źródłowy metody MBP. Całość rozprawy obejmuje 151 stron.

Tytuł recenzowanej rozprawy doktorskiej odpowiada w pełni jej treści, ułożonej w typową dla rozpraw doktorskich strukturę. Tytuł rozprawy sformułowano ogólnie jako badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych, podczas gdy badania te skupiają się głównie na analizie zależności prądu krytycznego  $I_c$  taśm nadprzewodnikowych HTS oraz jego gęstości  $J_c$  i wykładnika  $n$  w prawie potęgowym od indukcji magnetycznej i kąta ekspozycji taśm w zewnętrznym polu magnetycznym. Oczywiście podjęte szczegółowe badania, co należy podkreślić, bardzo wszechstronne, zarówno obliczeniowe, jak i pomiarowe, mieszczą się w sformułowanym ogólnie tytule rozprawy. Struktura pracy została szczegółowo omówiona w dalszej części recenzji.

#### Tematyka rozprawy

Od wielu lat prowadzone są intensywne prace badawcze nad wykorzystaniem nadprzewodnictwa w urządzeniach elektroenergetycznych, dzięki czemu możliwe jest zwiększenie efektywności i ograniczenie strat mocy tych urządzeń. Możliwe jest to poprzez wykorzystanie szczególnych właściwości materiałów nadprzewodnikowych, które w bardzo niskich temperaturach kriogenicznych wykazują się zerową rezystywnością, a zatem bezoporowym przewodzeniem prądu. Przewody nadprzewodnikowe mogą przewodzić bezstratnie znaczne prądy o gęstościach większych

o kilka rzędów wielkości niż konwencjonalne przewody miedziane. Cewki nadprzewodnikowe mogą generować silne pola magnetyczne sięgające kilku tesli. Urządzenia nadprzewodnikowe wchodzące w skład systemu elektroenergetycznego, takie jak transformatory, generatory i silniki, nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarcia (SFCL), nadprzewodnikowe zasobniki energii (SMES) oraz kable nadprzewodnikowe w elektroenergetycznych liniach przesyłowych mogą skutecznie wspomagać obecnie istniejące systemy.

Do produkcji wymienionych urządzeń niezbędne jest zastosowanie materiałów nadprzewodnikowych, przede wszystkim w postaci przewodów nawojowych wykonanych w postaci taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych HTS (High-Temperature Superconductors). W każdym z tych urządzeń znajdują zastosowanie taśmy nadprzewodnikowe HTS, które zazwyczaj pracują w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, wykazując się przy tym silną anizotropią magnetyczną. Pole to ma silny negatywny wpływ na wartości krytycznego prądu  $I_c$  taśmy nadprzewodnikowej, który jest jednym z czynników limitujących jej wykorzystanie w silnoprądowym urządzeniu nadprzewodnikowym. Zatem istotnym zagadnieniem warunkującym możliwość zastosowania danego typu taśmy w urządzeniu nadprzewodnikowym jest zbadanie wpływu indukcji zewnętrznego pola i kąta jego nachylenia do powierzchni taśmy na wartość prądu krytycznego i jego gęstości. Wyniki badań związanych z charakteryzacją, czyli modelowaniem i wyznaczaniem parametrów taśm nadprzewodnikowych, mogą mieć istotne znaczenie w doborze warunków pracy taśm HTS będących istotnym składnikiem elektroenergetycznych urządzeń nadprzewodnikowych. Należy podkreślić, że przeprowadzenie charakteryzacji taśm HTS jest zagadnieniem niezwykle trudnym, wymagającym zarówno stosowania złożonego modelowania matematycznego zjawisk związanych z nadprzewodnictwem, jak też skomplikowanego i wielostronnego podejścia eksperymentalno-pomiarowego, uwzględniającego jednocześnie zagadnienia kształtowania pola magnetycznego jak i technologii kriogenicznej zapewniającej utrzymanie bardzo niskich temperatur.

Recenzowana rozprawa doktorska mieści się w obszarze badań nawojowych przewodów nadprzewodnikowych wykorzystywanych w konstrukcji urządzeń elektroenergetycznych, a ze względu na jej złożoność i wielowątkowość, wnosi istotny wkład do elektrotechniki w obszarze nadprzewodnikowych urządzeń elektroenergetycznych, będącej częścią składową dyscypliny naukowej „Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne”.

## **Teza i cel rozprawy**

Tezę rozprawy Doktorant sformułował następująco:

**„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”.**

Powyższa teza jest sformułowana poprawnie, gdyż cel i zakres badań realizowanych w kolejnych częściach pracy prowadzą konsekwentnie do udowodnienia postawionej tezy.

Ogólnym celem rozprawy doktorskiej jest zrealizowanie obliczeniowych i eksperymentalno-pomiarowych badań prądu krytycznego wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych HTS pracujących w zewnętrznych polach magnetycznych do 0,5 T w zależności od indukcji magnetycznej oraz kąta ekspozycji taśm umieszczonych w tych polach.

## **Struktura rozprawy i rozpatrywane zagadnienie badawcze**

Pierwszy rozdział rozprawy zawiera wstęp, w którym zamieszczono motywację podjęcia badań, cel i tezę pracy oraz zakres i metodykę badań, a także strukturę pracy. We wstępie zostały umieszczone również cele szczegółowe i zadania badawcze, postawione przez Doktoranta, aby zrealizować sformułowany cel i udowodnić tezę rozprawy, które zostały konsekwentnie rozwinięte w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Rozdział drugi zatytułowany „Podstawy nadprzewodnictwa” sięga do pierwszych badań, które zapoczątkowały rozwój nadprzewodnictwa, omawia istotę tego zjawiska oraz kolejne odkrycia w zakresie nadprzewodnictwa nisko- i wysokotemperaturowego, a także wybrane teorie: Londonów, Ginzburga-Landaua i teorię BCS (Bardeena, Coopera i Schrieffera). Dokonuje też podziału nadprzewodników na nadprzewodniki I-typu i II-typu. Następnie opisuje materiały nadprzewodnikowe: niskotemperaturowe LTS (Low-Temperature Superconductor) i wysokotemperaturowe HTS (High-Temperature Superconductor), skupiając się na kilku materiałach nadprzewodnikowych, które mają właściwości silnoprądowe, umożliwiające ich zastosowanie w energetyce. Zwraca przy tym uwagę na anizotropię materiału YBCO opisując parametr anizotropii w zależności Blattera (2.20), do którego odnosi się w opisie modeli kątowych prądu krytycznego w rozdz. 3.4. Omawiając parametry krytyczne  $T_c$ ,  $H_c$  i  $J_c$  przytacza klasyczny model Kima (równanie 2.27) uwzględniający anizotropię magnetyczną taśmy nadprzewodnikowej. Równanie to stanowi podstawę zaproponowania sześciu modeli kątowych prądu krytycznego (rozdz. 3.4) i dalszej analizy przeprowadzonej w rozprawie. Przytoczone są również modele wykorzystywane w analizie zjawiska nadprzewodnictwa: model stanu krytycznego i prawo potęgowe  $E$ - $J$ , do którego wykładnika potęgowego  $n$  wielokrotnie odnosi się m.in. w rozdziale 3.3 i 6.2. Na koniec rozdziału drugiego Autor opisuje zastosowania nadprzewodników wysokotemperaturowych HTS w elektroenergetyce i w systemach transportowych opartych na lewitacji magnetycznej.

Szkoda, że opisując zastosowania w elektroenergetyce, Autor pominął nadprzewodnikowe zasobniki energii SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), w których cewkach również wykorzystywane są taśmy nadprzewodnikowe, będące obiektem badań, podobnie jak w kablach, silnikach, generatorach, transformatorach i ogranicznikach prądu zwarcia.

W rozdziale trzecim Doktorant zawarł podstawowe informacje o wysokotemperaturowych taśmach nadprzewodnikowych HTS pierwszej i drugiej generacji 1G i 2G, a następnie przedstawił wybrane metody produkcji tych taśm. Dokonał również analizy porównawczej sześciu typów komercyjnie dostępnych taśm. Dla każdej z taśm o szerokości 4 mm wyznaczył zależności prądu krytycznego  $I_c(B, \theta)$  w funkcji indukcji magnetycznej  $B$  w zakresie  $0 \div 1$  T oraz kąta  $\theta$  przyłożenia pola magnetycznego do taśmy HTS w zakresie  $0 \div 250^\circ$ , jak też zależności wykładnika w prawie potęgowym  $n(B, \theta)$ . Porównanie parametrów taśm zrealizowano w oparciu o ogólnodostępną bazę danych zawierającą wyniki charakteryzacji taśm [114] (Wimbush). Ponadto przeprowadził analizę porównawczą dla modeli służących do wyznaczania prądu krytycznego z uwzględnieniem wpływu anizotropii magnetycznej: dla 3 modeli opisanych w literaturze oraz dla trzech modeli analitycznych opracowanych przez Doktoranta. W modelach autorskich Doktorant wykorzystał zależność Blattera określając współczynnik anizotropii w opisie Ginzburga-Landaua, dobierając parametry modeli w oparciu o nowatorski metaheurystyczny algorytm optymalizacyjny nietoperzy (Bat Algorithm). Modele te zostały z sukcesem zweryfikowane dla opisanych w rozdziale 3.3 pięciu różnych taśm HTS.

Rozdział czwarty stanowi opisuje istotę metody bezparametrycznej (MBP) wyznaczania gęstości prądu krytycznego taśm nadprzewodnikowych na podstawie danych pomiarowych. Stanowi ona szybkie i dokładne narzędzie obliczeniowe, które nie wymaga wiedzy o modelach, ich parametrach i wzajemnych relacjach oraz metod optymalizacji stosowanych do estymacji parametrów taśm nadprzewodnikowych HTS. Opracowane zostały dwie wersje metody MBP: model 1D zbudowany w środowisku programu Matlab oraz model 2D integrujący środowiska Matlab i Comsol Multiphysics. Metoda ta powstała w ramach współpracy Doktoranta z Instytutem Fizyki Technicznej Karlsruhe Institute of Technology w Niemczech i opublikowana w wiodącym w tematyce technologii nadprzewodnikowych czasopiśmie „Superconductor Science and Technology”, co należy zaliczyć do osiągnięć Doktoranta. Warto zauważyć, że metoda bezparametryczna została z sukcesem wykorzystana i doceniona w kilku artykułach innych autorów, również w czasopiśmie „Superconductor Science and Technology”, do modelowania anizotropii prądu krytycznego oraz

wyznaczania strat zmiennoprądowych przewodów HTS w rzeczywistych cewkach i transformatorach.

W rozdziale piątym opisane zostało stanowisko pomiarowe wykorzystujące metodę czterozaciskową do wyznaczania kątovej i magnetycznej charakteryzacji taśm HTS, którego wyniki pomiarów zamieszczono w rozdziale 3.3. Najważniejszym osiągnięciem Doktoranta jest jednak opracowane i skonstruowane przez niego stanowisko pomiarowe do charakteryzacji taśm HTS, polegającej na wyznaczaniu ich prądu krytycznego  $I_c(B, \theta)$  oraz wykładnika potęgowego  $n(B, \theta)$  w zależności od indukcji zewnętrznego pola magnetycznego  $B$  oraz kąta nachylenia  $\theta$  tego pola do osi taśmy. Stanowisko to wykorzystuje układ cylindrycznej macierzy Halbacha złożony z ośmiu sześciennych lub prostopadłościennych magnesów neodymowych  $Nd_2Fe_{14}B$  jako źródła jednorodnego pola magnetycznego oddziałującego na próbkę taśmy HTS pod różnymi kątami względem jej powierzchni. Poprzednio Doktorant wykorzystał do charakteryzacji taśm bardzo rozbudowany stacjonarny układ złożony z kriogenicznej komory z umieszczonym w niej elektromagnesem nadprzewodnikowym wraz z oprzyrządowaniem zawierającym kompresor, sondę temperatury i pola magnetycznego, układem obrotowym oraz systemem akwizycji danych i układem sterowania elektromagnesu umieszczonym w szafie serwerowej. W odróżnieniu do tego klasycznego stanowiska pomiarowego Doktorant skonstruował nowatorskie kompaktowe i mobilne stanowisko badawcze, w niewielkim stopniu wykorzystujące stacjonarny sprzęt laboratoryjny, które dzięki wykorzystaniu koncentratora pola magnetycznego i trzech wymiennych tarcz w układzie Halbacha umożliwiły badanie taśm nadprzewodnikowych dla różnych wartości pola magnetycznego. Podczas projektowania stanowiska przeprowadził modelowanie pola magnetycznego z wykorzystaniem skryptu w Matlabie oraz oprogramowania ANSYS w celu określenia zmian indukcji na powierzchni taśmy HTS i potwierdzenia słuszności przyjętej koncepcji układu. Przeprowadzone zostały również pomiary indukcji magnetycznej dla trzech układów magnesów w temperaturze ciekłego azotu (77 K) oraz pokojowej (295 K) przy użyciu gausometru oraz czujnika Halla. Dokonano również potwierdzenia funkcjonalności zaprojektowanego stanowiska do charakteryzacji taśm HTS z wykorzystaniem magnesów trwałych poprzez wstępne pomiary prądu krytycznego dla taśmy 1G BiSCCO produkcji firmy American Superconductors oraz taśmy 2G YBCO firmy japońskiej SuperOx stosując metodę czterozaciskową i kryterium natężenia pola elektrycznego  $1 \mu V/cm$ . Wyniki tych badań te zostały potwierdzone również z wykorzystaniem opracowanej z udziałem Doktoranta metody bezparametrycznej wyznaczania gęstości prądu krytycznego.

W wyniku badań próbnych Doktorant wprowadził usprawnienia konstrukcyjne wykonując drugą wersję stanowiska z poprawioną funkcjonalnością, umożliwiającą wyższą rozdzielczość nastawy kąta przyłożenia pola magnetycznego  $\theta$  do taśmy HTS, mechaniczną stabilność oraz zwiększenie liczby cylindrycznych układów Halbacha pozwalających na pomiary przy czterech wartościach indukcji magnetycznej. Dokonał również półautomatyzacji wyznaczania prądu krytycznego dla poszczególnych wartości kątów  $\theta$ , wykorzystując kamerę i opracowany program OCR (Optical Character Recognition) optycznego rozpoznawania znaków.

Opracowanie stanowiska pomiarowego w oparciu o magnesy neodymowe wg. koncepcji Halbacha stanowi nowatorskie podejście do charakteryzacji taśm HTS, którą Doktorant zrealizował i zweryfikował w rozdziale szóstym. Z wykorzystaniem opracowanego stanowiska badawczego przeprowadził w tym rozdziale analizę porównawczą dla taśmy 1G produkcji firmy American Superconductors oraz trzech taśm 2 G firmy SuperPower SCS4050, SCS4050-AP (Advanced Performance) oraz SCS4050-AP-i (Advanced Performance-improved), wszystkie o szerokości 4 mm. Dla wymienionych czterech taśm HTS przedstawił wyniki pomiarów charakterystyki kątovej  $I_c(B, \theta)$  oraz wykładnika potęgowego  $n(B, \theta)$ , szczegółowo analizując wpływ obu parametrów na otrzymane charakterystyki. Pomiary z wykorzystaniem autorskiego stanowiska wykonał dla pięciu wartości indukcji magnetycznej. Wyniki tych pomiarów wykorzystał następnie do opracowania własnej bazy danych modeli numerycznych, uzasadniając, że właściwy dobór taśm HTS do odpowiednich zastosowań powinien być potwierdzony analizą modeli gęstości prądu lub znajomością

charakterystyki kątowej prądów krytycznych. Rozdział został zakończony dyskusją otrzymanych wyników zaprezentowanych poprzez znormalizowany prąd krytyczny obrazujący redukcję prądu krytycznego w zależności od indukcji magnetycznej i kąta ustawienia względem linii sił pola magnetycznego. Na jej podstawie zaproponowany został proces doboru punktów pracy dla taśm HTS. Na wykresie biegunowym dokonano również porównania wyników uzyskanych z wykorzystaniem macierzy Halbacha z wynikami charakteryzacji otrzymanymi z użyciem elektromagnesów zwyczajowo wykorzystywanych do wytworzenia jednorodnego pola magnetycznego na powierzchni taśmy.

W rozdziale siódmym Doktorant zawarł podsumowanie badań, formułując wnioski, kluczowe osiągnięcia Autora oraz możliwości przyszłych prac badawczych związanych z charakteryzacją taśm nadprzewodnikowych HTS.

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Rozprawa dotyczy istotnego zagadnienia, jakim jest charakteryzacja wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych, będących najważniejszym składnikiem uzwojeń silnoprądowych urządzeń nadprzewodnikowych, mających zastosowanie w elektroenergetyce. Najważniejsze z tych elektroenergetycznych urządzeń nadprzewodnikowych, to kable, silniki i generatory, transformatory, ograniczniki prądu zwarcia, magnetyczne zasobniki energii i układy lewitacji magnetycznej oraz łożysk magnetycznych w systemach transportowych.

W rozprawie Autor skupił się na konsekwentnym dążeniu do zrealizowania postawionego celu, wyrażonego również ogólnie w tytule rozprawy, jakim jest badanie wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych. Głównym parametrem opisującym właściwości istotne dla utrzymania wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych HTS w stanie nadprzewodnictwa, jest prąd krytyczny  $I_c$ , jego gęstość  $J_c$  oraz wykładnik w prawie potęgowym Rhynera opisującym zależność  $E$ - $J$  w nadprzewodniku wysokotemperaturowym. Tytuł ten mógłby być zatem zawężony do badań wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na prąd krytyczny wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych HTS. W obu przypadkach jednak tematyka badań dotyczy trudnego zagadnienia charakteryzacji taśm HTS, które w uzwojeniach elektroenergetycznych urządzeniach nadprzewodnikowych mogą pracować przy różnych poziomach indukcji  $B$  jak i wartościach kąta przyłożenia pola magnetycznego  $\theta$  do taśmy HTS.

Zgodnie z deklaracją Autora, jednym z głównych celów rozprawy jest udowodnienie postawionej tezy:

**„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”**

Należy podkreślić, że tak sformułowany główny cel pracy został osiągnięty poprzez badania zarówno modelowe i obliczeniowe, jak i badania eksperymentalne charakteryzacji taśm HTS, przeprowadzone na oryginalnym, skonstruowanym i wszechstronnie zaprojektowanym i przebadanym przez Autora stanowisku pomiarowym, które stanowią największą wartość użytkową rozprawy. Otrzymane wyniki badań eksperymentalno-pomiarowych jak i modelowych potwierdzone zostały wielostronnymi i szeroko zakrojonymi badaniami i modelowaniem matematycznym, w tym opracowaniem i zweryfikowaniem autorskich modeli zależności kątowej i magnetycznej prądów krytycznych dostępnych komercyjnie taśm nadprzewodnikowych HTS, z wykorzystaniem do tego celu w kilku publikacjach współautorskiej bezparametrycznej metody MBP wyznaczania prądów krytycznych. Autorskie stanowisko pomiarowe oraz opracowane metody obliczeniowe mogą być podstawą kolejnych badań umożliwiających wyznaczanie punktów pracy innych dostępnych taśm HTS w elektroenergetycznych urządzeniach nadprzewodnikowych.

Eksperymentalno-obliczeniowa kompleksowa charakteryzacja wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych HTS w zewnętrznym jednorodnym polu magnetycznym stanowi **oryginalne**

**rozwiązanie wskazanego złożonego problemu naukowego**, który podjęto w rozprawie. Autor przeprowadził kompletny cykl badawczy rozpoczynając od **analitycznego ujęcia problemu**, w którym zastosował zarówno wykorzystywane do tej pory, jak też **nowe autorskie modele matematyczne** zjawisk fizycznych zachodzących w taśmach HTS pracujących w uzwojeniach silnoprądowych urządzeniach nadprzewodnikowych, poprzez **zaprojektowanie, skonstruowanie i zweryfikowanie oryginalnego stanowiska pomiarowego z użyciem układu Halbacha**, aż do wykorzystania tego stanowiska w badaniach wpływu pola magnetycznego na parametry taśm i **wyciągnął stosowne wnioski** odnośnie określania skuteczności przeprowadzonej charakterystyki tych taśm.

Takie podejście potwierdza **umiejętność prowadzenia przez Autora samodzielnej pracy badawczej**, posiadania **wyróżniających zdolności** modelowania z wykorzystaniem zaawansowanych autorskich modeli i systemów obliczeniowych Matlab i ANSYS oraz umiejętności projektowych i konstrukcyjnych podczas tworzenia autorskiego stanowiska pomiarowego. Prowadzone badania mają **charakter interdyscyplinarny**, gdyż obejmują wiedzę z zakresu nadprzewodnictwa, w którym wiele zagadnień nie posiada jeszcze ugruntowanej teorii, a istniejące opisy matematyczne bazują na danych empirycznych, materiałoznawstwa elektrotechnicznego taśm HTS, numerycznych metod obliczeń rozkładu pól magnetycznych, metody wyznaczania niepewności pomiarowej mieszczącej się w metrologii elektrycznej, zagadnień projektowania komputerowego i addytywnego druku 3D konstrukcji mechanicznej koncentratora jednorodnego pola magnetycznego i mechanizmu nastawy kąta jego nachylenia do powierzchni taśmy, jak też półautomatyzacji systemu pomiarowego wyznaczania prądów krytycznych z wykorzystaniem kamery i systemu OCR optycznego rozpoznawania znaków wyświetlanych przez miernik.

Umiejętność powiązania tak wielu zagadnień szczegółowych, zarówno teoretycznych jak i praktycznych potwierdza, że Autor **posiada** zarówno **ogólną wiedzę teoretyczną** w dyscyplinie, w której prowadzone są badania, jak też rozległe i **wielostronne umiejętności badawcze, konstrukcyjne i doświadczenie praktyczne** w modelowaniu numerycznym, projektowaniu konstrukcji mechanicznych, jak i w badaniach eksperymentalno-pomiarowych.

### **Ocena doboru i wykorzystania źródeł i aktualnego stanu wiedzy**

Rozprawa doktorska charakteryzuje się prawidłowym doborem i wykorzystaniem źródeł literaturowych. Spis literatury, zamieszczony na końcu pracy, zawiera 166 pozycji literatury ułożonych w kolejności cytowania. Spis zawiera zarówno pozycje książkowe, jak i zdecydowaną większość artykułów opublikowanych w czasopismach oraz w formie referatów konferencyjnych, w tym 157 pozycji opublikowanych w języku angielskim i 9 w języku polskim.

Wartość naukową rozprawy doktorskiej podnosi przedstawienie **analizy aktualnego stanu wiedzy** w zakresie matematycznego modelowania jak i eksperymentalnego charakteryzowania właściwości nadprzewodników, odnoszących się głównie do ich parametrów krytycznych, z bieżącymi i licznymi cytowaniami źródeł literaturowych. Autor zaprezentował w rozprawie duże rozeznanie we współczesnej angielskojęzycznej literaturze światowej, poprawnie umieszczając na jej tle i opisując swój wkład w podjętą tematykę rozprawy doktorskiej.

Należy podkreślić też nawiązanie do 13 współautorskich publikacji Doktoranta, które dotyczą prezentowanej w rozprawie tematyki, zamieszczonych w punktowanych przez MNiSW czasopismach: w wiodącym w tematyce technologii nadprzewodnikowych recenzowanym czasopiśmie „Superconductor Science and Technology” (SUST), „International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics” (2 artykuły), „Przegląd Elektrotechniczny” (2 artykuły), „Śląskie Wiadomości Elektryczne”, jak też w materiałach Międzynarodowego Sympozjum ISEF (2 opublikowane referaty) oraz Międzynarodowej Konferencji ELMECO & AoS (3 opublikowane referaty). Szczególną wartość w środowisku naukowym ma pierwszy z wymienionych współautorski artykuł opublikowany w czasopiśmie „SUST” w 2017 r. w ramach współpracy Autora z Instytutem Fizyki Technicznej Karlsruhe Institute of Technology w Niemczech.

Godne uznania jest wielokrotnie podkreślane dążenie Autora do **analizy zgodności uzyskanych wyników modelowania numerycznego z danymi eksperymentalnymi** uzyskanymi w skonstruowanym stanowisku pomiarowym wykorzystującym cylindryczne macierze Halbacha, jak też z danymi udostępnionymi przez producentów oraz zamieszczonymi w źródłach literaturowych, co również podnosi wartość naukową recenzowanej rozprawy.

### Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Przedstawiona powyżej ocena merytoryczna rozprawy pokazuje jej **wysoką wartość naukową**. Na podstawie szczegółowej lektury rozprawy można wskazać jednak pewne zagadnienia, które przedstawiono w sposób nieprecyzyjny, niespójny lub niepełny. **Niektóre z nich** wymagałyby wyjaśnienia lub komentarza ze strony Autora.

1. W rozprawie pojawia się pewna nieścisłość i niekonsekwencja terminologiczna w postaci używania pojęcia „stan normalny” (w rozdziale 2.2 - str. 26, rys. 2.3 - str. 28, rozdz. 2.3 - str. 29, str. 30-31), podczas gdy np. w rozdziale 2.7.4, str. 47 mowa jest o „normalnych warunkach pracy” nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w sensie pracy w „stanie nadprzewodnictwa”.

Pojęcie „stan normalny” stosowane jest powszechnie w środowisku fizyków, którzy nie badają działania przewodów ani urządzeń nadprzewodnikowych, lecz materiały nadprzewodnikowe. Natomiast z punktu widzenia analizy działania urządzeń nadprzewodnikowych w elektrotechnice, znamionowym, czyli normalnym stanem pracy urządzenia, jest „stan nadprzewodnictwa”, w przeciwieństwie do „stanu rezystywnego”, który jest nienormalnym stanem pracy urządzenia nadprzewodnikowego. Dla zachowania spójności terminologicznej w zakresie elektrotechniki urządzeń nadprzewodnikowych pojęcia te mogłyby być stosowane konsekwentnie w całej rozprawie.

W rozdz. 2.1 str. 22 stwierdzono, że materiał poniżej temperatury krytycznej staje się nadprzewodnikiem. Z punktu widzenia opisu taśm i urządzeń nadprzewodnikowych precyzyjniej byłoby stwierdzić, że przechodzi on w **stan nadprzewodnictwa**, gdyż materiał nadprzewodnikowy może być w tym stanie, ale będąc **w stanie rezystywnym** w dalszym ciągu jest **materiałem nadprzewodnikowym**.

2. W rozdz. 2.5.2 na str. 39 zamieszczono równanie (2.26), w którym w wykładniku zamiast  $-1$  powinno być  $-b$ , a równaniach (2.27), współczynnik  $b$  określany jest jako współczynnik tłumienia, jednak nie wyjaśniono, jak jest on zdefiniowany. Ponadto przy opisie modelu stanu krytycznego (rozdz. 2.6.1) w równaniu (2.28) występuje również symbol  $b$ . Zatem powstaje pytanie, czy jest to ten sam współczynnik w obu równaniach?
3. W rozdz. 2.6 na str. 41 stwierdzono, że wartość współczynnika  $n$  oznaczającego wykładnik w prawie potęgowym wyznacza się z zależności (2.32), co jednak nie wynika z podanego równania, jak i z rysunku 2.14.
4. W rozdz. 2.7.4 (str. 48) w tabeli 2.7 zestawiono przykłady instalacji wykorzystujących nadprzewodnikowe ograniczniki prądu, ograniczając się do SFCL tylko typu rezystancyjnego, podczas gdy znane są też instalacje z innymi typami SFCL.
5. W rozdz. 3.3 na str. 53 stwierdzono, że porównanie parametrów taśm HTS zrealizowano w oparciu o ogólnodostępną bazę danych [114, Wimbush] zawierającą wyniki charakterystyki tych taśm. Natomiast w rozdz. 5.1 wspomniano o metodzie czterozaciskowej wykorzystywanej do charakterystyki taśm HTS w oparciu o pomiary, których założenia opisane zostały w rozdziale 3.3. Proszę zatem Doktoranta o sprecyzowanie, w jaki sposób uzyskane zostały wykresy  $I_c(B, \theta)$  oraz  $n(B, \theta)$  zaprezentowane w rozdz. 3.3. Ponadto wydaje się nieco dziwna kolejność prezentacji w rozprawie: najpierw przedstawiono w rozdz. 3.3 wyniki pomiarów, a dopiero w rozdz. 5.1 opisano system wykorzystywany do charakterystyki tych taśm HTS.
6. W rozdz. 3.3.3 (str. 57) w drugim akapicie stwierdzono w jednym zdaniu, że „Analizowana taśma cechuje się bardziej równomierną zależnością kątową, która wraz ze spadkiem pola magnetycznego staje się bardziej stroma”, co jednak nie jest widoczne na opisywanym rysunku 3.9 (b). Proszę Doktoranta o skomentowanie tej niezgodności.

7. W rozdz. 3.3.4 (str. 58) w komentarzu do rys. 3.11 stwierdzono, że w taśmach SuperOx obserwuje się znaczną redukcję prądów krytycznych, większą niż w innych taśmach, jednak porównanie z rys. 3.13 dla taśmy SuperPower Advanced Pinning chyba nie całkiem uzasadnia to stwierdzenie.
8. W rozdz. 3.3.6 dla taśmy firmy Theva stwierdzono ekstrema prądu krytycznego dla kąta  $110^\circ$ , jednak obserwacja rys. 3.15 wskazuje na nieco niższe wartości kąta dla ekstremum.
9. W równaniach (3.9) i (3.10) dla metaheurystycznego algorytmu optymalizacyjnego nietoperzy (Bat Algorithm) zdefiniowano funkcje celu  $f_{L1}(x)$  oraz  $f_{L2}(x)$ . Co oznacza zmienna  $x$ , względem której są te funkcje? Ponadto na rys. 3.18 a) i b) nie w pełni opisano znaczenie poszczególnych linii, a przecież każdy rysunek powinien być opisany tak, aby nawet bez komentarza w tekście pracy można było poznać wszystkie jego składniki.
10. Na rys. 3.19 i 3.20 porównano wyniki pomiarów z modelami matematycznymi anizotropii dla taśm odpowiednio AMSC i SuperPower, nie opisano jednak, dla jakich wartości indukcji są poszczególne wykresy. Ponadto stwierdzono, że widoczna jest rozbieżność dla modeli przy polu własnym – proszę pokazać, gdzie widać te rozbieżności.
11. W podsumowaniu rozdziału 3.5 stwierdzono, że na podstawie zestawionych danych oraz charakterystyk kątowych stwierdzono, że dla zależności odbiegających od standardowych opisów eliptycznych lepsze są modele hiperboliczne. Proszę uzasadnić na podstawie charakterystyk, dlaczego można tak stwierdzić.
12. Tytuł rozdziału 4 „Metoda bezparametryczna” wydaje się zbyt lakoniczny dla czytelnika rozprawy. Powinien on być nieco rozszerzony, wskazując, czego dotyczy ta metoda, np. „Metoda bezparametryczna wyznaczania gęstości prądu krytycznego taśm HTS”.
13. Przy opisie istoty metody bezparametrycznej w rozdz. 4.2 stosowane są w równaniach (4.2)-(4.5) oznaczenia parametrów geometrycznych  $a$ ,  $r$ , kąt  $\alpha$ ,  $x$ ,  $x'$ ,  $y$  oraz składowych indukcji magnetycznej, jednak równania te nie są zrozumiałe bez dołączenia stosownego rysunku. Proszę Doktoranta o szczegółowe uzasadnienie wyprowadzenia tych równań w oparciu o rysunek geometrii analizowanej taśmy HTS.
14. Na rys. 4.6 (str. 76) przedstawiającym algorytm działania metody bezparametrycznej MBP umieszczono w pierwszym i drugim bloku symbol  $A$ , znaczenie którego nie jest jednoznaczne, gdyż w pierwszym bloku dzielenie prądu krytycznego przez  $A$  sugeruje, że jest to pole powierzchni przekroju poprzecznego, podczas gdy w drugim bloku symbol iloczynu wektorowego w równaniu Poissona sugeruje, że może to być magnetyczny potencjał wektorowy. Proszę o wyjaśnienie tej niezgodności.
15. W komentarzu do rys. 4.8 Autor wskazuje na istotną zaletę metody MBP w odwzorowaniu modeli z danych pomiarowych, podając wartości błędu średniokwadratowego dla taśm AMSC oraz SuperPower. Z wykresów 3D gęstości prądu  $J_c(B, \theta)$  na rys. a i c, na których nie ma podanych jednostek miary, trudno ustalić rzeczywiste wartości. Ponadto w jaki sposób obliczany był procentowy błąd średniokwadratowy obliczeń gęstości prądu krytycznego dla obu taśm?
16. Na rys. 4.9 obrazującym jedno z zastosowań opracowanej z udziałem Autora metody MBP, rysunki a) i b) podpisane są jako modele  $J_c(B, \theta)$  odpowiednio dla taśm AMSC oraz SuperPower, jednak w rzeczywistości rys. a) raczej przedstawia wykres 3D zależności  $J_c(B_{||}, B_{prostop})$ , a rysunek d) zależność kątową prądu krytycznego, a nie gęstości prądu. Proszę Doktoranta o uściślenie opisu porównania zamieszczonych rysunków 4.9, bądź korektę samych wykresów. Dotyczy to także rys. 4.8. Proszę również o informację, w jakim urządzeniu nadprzewodnikowym zaprojektowano magnes nadprzewodnikowy o wartości indukcji aż 30 T. Natomiast w dalszym komentarzu do rys. 4.9c można przeczytać, że są to, zgodnie z prawdą, charakterystyki prądu krytycznego.
17. W rozdziale 5.3 Autor w opisie analitycznym rozkładu **indukcji magnetycznej**, tłumaczonej z terminologii angielskojęzycznej dosłownie jako **gęstość strumienia magnetycznego**, wykorzystuje koncepcję Halbacha opisaną w pracy [162] Soltnera i Blümlera w 2010 r.



- i zastosowaną do modelowania układu rezonansu magnetycznego. Wprawdzie równanie (5.2) jest zacytowane wprost ze wspomnianej publikacji, jednak interesujące byłoby, gdyby Autor mógł zaprezentować istotę wyprowadzenia tego równania odwołując się do stosownych zależności geometrycznych i uzgodnienia oznaczenia  $D_{in}$  średnicy wewnętrznej stosowanego na charakterystykach przedstawionych na rys. 5.5 z oznaczeniami na rys. 5.3.
18. W rozdziale 5.4.2 opisującym modelowanie z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS, Autor powołuje się słownie na związek między wektorem indukcji magnetycznej  $\mathbf{B}$ , a magnetycznym potencjałem wektorowym  $\mathbf{A}$ , bez przytoczenia konkretnego równania. Czy Autor mógłby jednak wskazać, jakie równanie wraz z warunkami brzegowymi stanowi podstawę obliczeń rozkładu magnetycznego potencjału wektorowego  $\mathbf{A}$  w zaimplementowanej w programie ANSYS metodzie elementów skończonych?
  19. W rozdziale tym Autor pisze o zastosowaniu warunku brzegowego I rodzaju rozchodzeniu się fal elektromagnetycznych do nieskończoności, podczas gdy w analizowanym układzie występuje stałe w czasie pole magnetyczne wytworzone przez magnesy trwałe.
  20. Ponadto Autor w komentarzu do rys. 5.8 i 5.9 pisze o rozkładzie **gęstości strumienia magnetycznego** oraz **indukcji magnetycznej**, podczas gdy pojęcia te oznaczają tę samą wielkość fizyczną, a pierwsze z nich jest dosłownym tłumaczeniem terminu angielskojęzycznego.
  21. W rozdz. 5.5 (str. 92) w opisie stanowiska badawczego Autor używa nadmiarowego w zaprojektowanym układzie chłodzenia poprzez zanurzenie w ciekłym azocie pojęcia **temperatury „wrzenia ciekłego azotu”**, w której „właściwości mechaniczne będą **mniejsze**”. O jakie wielkości fizyczne/mechaniczne chodzi?
  22. W rozdziale 5.6, jak uzasadnić przyczynę wzrostu średniej wartości indukcji  $B$  mierzonej gausometrem FH-51 o ok. 20% po schłodzeniu do temperatury  $T = 77$  K, podczas gdy pomiary czujnikiem Halla nie wykazały wpływu temperatury na zmierzoną wartość indukcji?
  23. W rozdziale 5.7 dotyczącym wstępnych pomiarów prądów krytycznych, na str. 98 Autor stwierdza, że wartości prądów krytycznych są zgodne z **modelem eliptycznym**. Proszę sprecyzować, o który konkretnie model kątowy prądu krytycznego chodzi. Na str. 99, akapit 2, Autor pisze z kolei, że widoczny jest **eliptyczny symetryczny kształt charakterystyki**. Czy to są różne pojęcia?
  24. Dalej, w akapicie 3 (str. 99) Autor pisze o modelu gęstości prądu w ujęciu 1D przedstawionym na rys. 5.21, natomiast w podpisie pod tym rys. mamy: a) model 2D i b) model 3D. Wydaje się, że jest to dwuznaczność terminologiczna, gdyż w obu przypadkach mamy to samo modelowanie w programie MATLAB w ujęciu 1D, natomiast wykresy (rys. 5.22 i 5.23) są przedstawione graficznie na dwa sposoby: w postaci: a) mapy (wykresu dwuwymiarowego  $J_c(B_x, B_y)$ ) oraz b) wykresu przestrzennego  $J_c(B_x, B_y)$ . W obu przypadkach są to tylko te same funkcje dwóch zmiennych przedstawione na dwa różne sposoby: poprzez a) wykres 2D oraz b) wykres 3D.
  25. Ciekawa jest wzmianka Autora w rozdz. 7.4 (str. 126) o planowanym wykorzystaniu analizy taśm HTS w procesie projektowania cewek nadprzewodnikowych do przesyłu bezprzewodowego. Czy Autor mógłby opisać ideę takiego przesyłu bezprzewodowego?

### Ocena redakcyjna rozprawy

Struktura rozprawy jest poprawna i czytelnie prezentuje w kolejnych rozdziałach postawiony problem, w tym motywację do podjęcia badań oraz metodykę badań.

We wstępie przedstawiono przyjęte założenia i wykonane badania, aby w finale doprowadzić do udowodnienia tezy. Użyta terminologia jest na ogół poprawna i zgodna z przyjętym nazewnictwem. Podział treści na rozdziały odpowiada przedstawianym zagadnieniom. Szczególnie pomocne dla czytelnika są streszczenia zamieszczone na początku każdego rozdziału.

Treści rozprawy nie budzą wątpliwości, a sama redakcja jest zasadniczo poprawna, zawiera jednak pewne uchybienia i niezręczności redakcyjne, językowe i stylistyczne, z których, ze względu na ich znaczną liczbę, tylko część wymieniono w podanym niżej zestawieniu.

W odczuciu recenzenta, Autor skupił się na wielowątkowym i bardzo starannym pod względem merytorycznym opracowaniu rozprawy, co jest głównym atutem pracy, jednak zabrakło mu czasu na drobiazgową korektę edytorską i stylistyczną, co niekiedy utrudnia czytelnikowi skupienie się na istocie opisywanych problemów. Drobne usterki edytorskie pojawiają się w wielu miejscach, nawet w tytule rozdziału 6 oraz w niektórych podtytułach (np. rozdz. 5.4.2).

Bardzo częstym uchybieniem redakcyjnym w całej rozprawie jest nagminne umieszczanie numerowanych równań matematycznych poza zdaniem zakończonym kropką, którego częścią powinno być to równanie zawarte w zdaniu i kończące to zdanie, ewentualnie wraz z wyjaśnieniem użytych symboli.

### Lista niektórych uchybień i niezręczności redakcyjnych, językowych i stylistycznych

- „Nazewnictwo”, str. 5-7:
  - niekompletny wykaz symboli łacińskich i greckich, m. in. nie zamieszczono stosowanych w rozprawie parametrów:  
 $b$ ,  $\alpha$ ,  $\theta$  (równ. 3.1), funkcji celu  $f_{L1}(x)$ ,  $f_{L2}(x)$  (równ. 3.9, 3.10), oraz parametru anizotropii Blattera  $\epsilon(\theta)$  (równ. 3.3),  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ , (równ. 3.7, 3.8),  
zamiast: „ $B_c$  Krytyczna gęstość strumienia magnetycznego” powinno być: „ $B_c$  Krytyczna indukcja magnetyczna”,  
str. 6: zamiast „Teoria BSC” powinno być: „Teoria BCS”, dotyczy to również spisu treści oraz tytułu i treści rozdziału 2.2.3,  
str. 6: przy NdFeB nie powinno być Yttrium Barium Copper Oxide,  
str. 6: brakuje „PVD Physical Vapour Deposition”  
str. 7 : symbol „Dyskretyzor wielomianu” nie występuje w tekście rozprawy,  
str. 7: zamiast  $\kappa$ -współczynnik proporcjonalności, powinno być  $\kappa$ - parametr G-L,  
ponadto brakuje w spisie oznaczenia  $\lambda_{GL}$ , opisującego ten sam współczynnik, oznaczanego też niekonsekwentnie jako  $\lambda$  (równanie 2.13, 2.14),
- R 1.3, str. 17, p.8: „przy ciśnieniu atmosferycznym 77 K”,
- R 1.4, str. 18, linia 5 od dołu: „dokonano porównania taśm firmy SuperPower”, należy uzupełnić „oraz firmy AMSC”,
- R 2.1, str. 23, akapit 6: „Poniżej temperatury krytycznej” powinno być „Powyżej temp. kryt.”,
- R 2.1, str. 24: „niż do tej pory znane nadprzewodniki” powinno być: „niż dla ... nadprzewodników”, akapit 3: „urządzeń nadprzewodzących” powinno być „urządzeń nadprzewodnikowych” akapit 4: „MgB<sub>2</sub>” należy uzupełnić „dwuborku magnezu MgB<sub>2</sub>”, ponadto zacytowana pozycja literatury [35] nie jest adekwatna, gdyż pochodzi ona z 1998 r., podczas gdy MgB<sub>2</sub> odkryto dopiero w 2001 r.
- R. 2.2.1, str. 25, akapit 2, 4 i 6, str. 26 (rozdz. 2.2.2): zamiast „elektrony nadprzewodnikowe” powinno być „elektrony nadprzewodzące”, rozdz. 2.2.2 (str. 28) – „nośniki nadprzewodzące”
- akap. 6: „równaniem Ampera, które zostało pominięte” powinno być „... zostało uzupełnione”
- str. 26: zamiast „zależność (2.3)” powinno być „zależność (2.5)”,  
akapit 4: „pole równe  $H_c$  – polu krytycznemu” – niezręczność językowa,  
str. 27, akapit 2: „funkcji folkowej” → „funkcji falowej”,  
akapit 3: „długość koherencji  $\xi$ ” – symbol ten nie występuje w równaniach G-L (2.9) i (2.10),
- str. 28, rys. 2.3 „S – stan nadprzewodnikowy” → „S – stan nadprzewodnictwa”
- str. 29, akapit 2: „nadprzewodnikach konwencjonalnych” → „nadprzewodnikach niskotemperaturowych”,  
akapit ostatni: „poniżej  $H_c$ ” → „poniżej krytycznego natężenia pola magnetycznego  $H_c$ ”,  
„przejście do stanu normalnego” → „przejście do stanu rezystywnego”,  
„normalnym” → „rezystywnym”,
- str. 30, przedostatni akapit: „w taśmach HTS” → taśmy HTS nie są nadprzewodnikami I-typu,  
ostatni pełny akapit: niezręczność stylistyczna,
- str. 35, akapit 1, ostatnie zdanie – niezręczność stylistyczna,  
rys. 2.10 (a): błąd literowy w słowie Hastelloy i w podpisie pod rys.,

- R. 2.7.2, str. 45, rys. 2.18: nie wskazano na rys. które to są cewki górne (3 i 4), a które dolne (1 i 2),
- R. 3.1, str. 50, drugi akapit: zamiast „filamenty nadprzewodnikowe” powinien być polski termin „włókno nadprzewodnikowe”,
- R 3.3.1, str. 55 zamiast skrótu ASMC powinno być AMSC (American Superconductors), podobnie w wielu innych miejscach rozprawy: R 3.4, str. 65, str. 66, tab. 3.2, str. 68, rys. 3.21, R 4.3, str. 78, R 6.2, str. 107, 111, R 6.3, str. 115.
- R. 3.3.3, pierwszy akapit: „elementy” → „pierwiastki”,
- R. 2.7.3, str. 46, drugi akapit: „transformatorów transmisyjnych” → „transformatorów nadprzewodnikowych”,
- R. 2.7.2, pierwszy akapit: brakuje w zdaniu słowa „które”,
- R 3, str. 49, 3 akapit, line 3 i 5: zamiast „w Rozdział” powinno być: „w rozdziale”,
- R. 3.1, str. 50, akapit 2: „filamenty nadprzewodnikowe” → „włókna nadprzewodnikowe”,
- R. 3.2, str. 51, akapit 2: „multiflamentowy nadprzewodnik” → „wielowłóknisty nadprzewodnik”,
- R. 3.3.2, akapit 3” „obserwowany jest 0 T a 0,2 T” – brakuje słowa „pomiędzy”,
- R 3.3.6 (str. 60), 2 akapit: słowo „przejmowane” – wydaje się być niewłaściwe, str. 61, akapit 2: niepotrzebne słowo „względem”, akapit 6: „projektowym” → „projektowanym”,
- R 3.4, str.64, akapit 1: „bezpośredni” → „bezpośrednio”, akapit 1, w ostatnim zdaniu: „dla której wyróżniono **dwukierunkowe** właściwości anizotropowe działające w **dwóch kierunkach**” – nadmiarowe słowa, str. 67 akapit 1: „sposób” → „spośród”,
- R.4 str. 71, akapit 4: „Strukturę rozdziałów podzielono na pięć podrozdziałów” – niezręczność stylistyczna,
- R. 4.2, str.74, rys. 4.4: brak oznaczenia poszczególnych części rysunku: a), b) i c), w podpisie również brak c),
- R. 4.3, akapit 2: „**Porównując** modele ... **widoczna jest** ponad 1,5 krotna różnica” niezręczność stylistyczna,
- R. 4.4, akapit 3: „Uzyskany model numeryczny przedstawiono na Rys. 4.9b” → „Wyniki uzyskanego modelu numerycznego przedstawiono na rys. 4.9b”, akapit 4: „...analizy wpływu magnetyzmu podłoża...” → „...analizy wpływu właściwości magnet. podłoża...”,
- R. 4.5, akapit 3: 2 błędy literowe,
- R. 5, str. 81, koniec akapitu 2: „W części końcowej zweryfikowano opracowane stanowisko wyżej działania poprzez pomiary pola magnetycznego oraz badania laboratoryjne ...” – zdanie niezrozumiałe, wymaga korekty gramatycznej.  
W tym streszczeniu rozdziału 5 zabrakło wzmianki o rozdz. 5.8.i 5.9.
- R. 5.1, str.83, ostatni akapit – 2 drobne błędy literowe,
- R. 5.2, str. 84, akapit 3: „co pozwalające...” → „co pozwala na...”, akapit 6: „prototypownia” → „prototypowania”, str. 85, akapit 1: „ $d_2$  – średnicy” →  $d_2$  – „średnica zewnętrzna układu”, akapit 3: „ruchomą głowicą” → „ruchomą głowicę”, akapit 3: „...układ Halbacha stanowią, jako element nieruchomy.” – niepotrzebne słowo „stanowią.”
- R. 5.4.1, akapit 1: „doliczenia” → „obliczenia”, koniec akapitu 2: „...poprzez zmianę odległości między magnesami, poprzez rozsuwanie magnesów...” – czym to się różni?
- R. 5.4.2, akapit 1: „Zjawisko zamodelowano” → „Zjawisko zamodelowano”, akapit 2: „gęstość strumienia magnetycznego...” → „indukcja magnetyczna”,
- R. 5.6, str. 95, ostatni akapit: „w zakresie założonych u pracy” → „w zakresie założonym w pracy”,
- R. 5.7, str. 96, akapit 1: „różne” → „różne”, str. 97, akapit 2: „stanowiska z układu magnesów Halbacha” → „stanowiska z układem magnesów Halbacha”,
- „**Zasilane** doprowadzone przewodem o **średnicy 16 mm<sup>2</sup>** a pomiar spadku napięcia **przewodem** o średnicy 1 mm<sup>2</sup>” - korekta zdania,
- R. 5.9, str. 104, akapit 2: „Pogowanie (binarne)” → „Progowanie (binarne)”,
- R. 6, str. 107, akapit 1, 3 zdanie „posłużyły analizy porównawczej” → „posłużyły do analizy porównawczej”, akapit 2: „opisane kolejnym rozdziale” → „opisane w kolejnym rozdziale”,
- R. 6, str. 111, niewłaściwy podpis pod Rys. 6.4,
- R. 6.3 (str.115), rys. 6.10 a) i b): brak opisu osi  $J_c(B_x, B_y)$  oraz jednostek na wszystkich osiach, str. 116, rys. 6.11: „Modele 3D oraz 2D” → raczej „Wykresy 3D oraz 2D”, powtórzone SCS4050, str. 117: „modelu Kia” → „modelu Kima”,

str. 117: „eliptyczna zależność” → raczej „eliptyczny kształt”,

str. 117: „gęstość prądu ... osiąga wartości ...” jednostka powinna być A/m<sup>2</sup>, podobnie w przedostatnim zdaniu.

- R. 6.4 (str.121), rys.6.16: w podpisie zbędny punkt b),
- W rozdz. 6.4 (str. 120), akapit 3: proces doboru warunków pracy przedstawiono na **rys. 6.15**, a nie 6.14.
- R. 7.2, str. 124, ostatni akapit: „w **zastosowalnych** kriogenicznych” → „w **zastosowaniach** kriogenicznych”, „dobór” → „doboru”,
- R. 7.4, str. 126, akapit 3: „tam” → „taśm”

**W rozdziale „Bibliografia”** występują liczne usterki redakcyjne polegające na zastąpieniu wielkich liter występujących w powszechnie używanych skrótach lub nazwach, literami małymi, np. Europe, HTS, FEM, DC, AC, YBCO, REBCO, kVA, MVA, MW, kV, kA, związkach chemicznych V<sub>3</sub>Si, Nb<sub>3</sub>Sn, MgB<sub>2</sub>, bądź nazwach firm: Long Island Power Authority, Albany, nazwach czasopism: Transactions on Applied Superconductivity, Superconductor Science and Technology, Journal of Alloys and Compounds, Journal of Applied Physics, nazw układów MagLev, procesów technologicznych MOCVD, materiałów konstrukcyjnych Hastelloy, nazw producentów: SuperPower, charakterystyk E-J, V-I, Hall mapping technique, 1G, 2G, High-T<sub>c</sub>. MOI. Usterki te, choć nie mają merytorycznego znaczenia, utrudniają czytelnikowi śledzenie opisu materiałów źródłowych i wskazują na niedopatrzenie redakcyjne podczas przygotowywania tekstu pracy do druku.

Ponadto wiele pozycji źródłowych nie posiada informacji o miejscu jego publikacji w czasopiśmie lub materiałach konferencji, np. poz. 21, 22, 49, 56, 67, 89, 90, 91, 100, 107, 108, 117, 134, 138, 144, 161, 163, 164, 165. Część z nich stanowi prawdopodobnie prezentacje multimedialne referatów, w których jest podany tylko autor, natomiast nie ma żadnych danych nt. miejsca i czasu przedstawienia oraz lokalizacji tego materiału źródłowego.

Znaczna objętość rozprawy zapewne wpłynęła na wystąpienie w tekście tych drobnych usterek redakcyjnych i niezręczności językowych, które mogłyby być wyeliminowane poprzez uprzednią korektę redakcyjną. Usterki te w żaden sposób nie obniżają jednak wysokiej merytorycznej wartości rozprawy.

#### **Podsumowanie i wnioski końcowe**

1. Oceniając zawartość przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Doktorant w sposób jednoznaczny **sformułował oryginalny problem badawczy, który następnie rozwiązał przy użyciu metod naukowych.**
2. Postawione cele rozprawy konsekwentnie zrealizował poprzez zbudowanie oryginalnego autorskiego stanowiska pomiarowego, jego zweryfikowanie obliczeniowe i eksperymentalne oraz praktyczne wykorzystanie do charakteryzacji wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych, przez co zostały **osiągnięte oczekiwane cele o charakterze naukowym jak i praktycznym.** Całość rozprawy potwierdza sformułowaną we wstępie tezę.
3. Doktorant wykazał się odpowiednim **opaniem wiedzy teoretycznej i umiejętnościami prowadzenia badań naukowych** w zakresie Elektrotechniki mieszczącej się w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.
4. Wymienione w recenzji **uwagi nie obniżają w żaden sposób wysokiej wartości merytorycznej** przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej.
5. Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Habeloka pt. „Badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych” **spełnia wymagania** określone przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i **wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**