

Opole, dn. 24.09.2024

Dr hab. inż. Andrzej Waindok, prof. Uczelni
Katedra Elektrotechniki i Mechatroniki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole
tel. (77) 449 8027, kom..
E-mail: a.waindok@po.edu.pl

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 1.10.2024
nr zał.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Krzysztofa Habelok

pt. Badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych

wykonanej po kierunku dr hab. inż. Mariusza Stępień z Politechniki Śląskiej w Gliwicach

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne prof. dr hab. inż. Moniki Kwoka
– pismo z dnia 25.07.2024.

1. Ocena wyboru tematu i tezy naukowej rozprawy

Nadprzewodniki stanowią od lat istotną część badań związanych z elektrotechniką. Brak strat rezystancyjnych pozwala na budowanie urządzeń o wysokiej sprawności, a uzyskiwane stosunkowo wysokie gęstości prądu dają możliwość generowania znacznych wartości indukcji magnetycznej, co znajduje zastosowanie m.in. w urządzeniach diagnostyki medycznej. Szczególnie intensywne badania prowadzi się nad poszukiwaniem nadprzewodników wysokotemperaturowych. Celem jest znalezienie materiału, który będzie wykazywał cechy nadprzewodnictwa w temperaturze pokojowej. Niestety, pomimo postępów, wydaje się, że ciągle jesteśmy daleko od jego osiągnięcia. Obecnie wykorzystywane nadprzewodniki pracują co najwyżej w temperaturze ciekłego azotu, a w przypadku zastosowań medycznych, gdzie wymagane jest uzyskanie pól magnetycznych na poziomie nawet 8 Tesli i więcej (rezonans magnetyczny oraz pozytonowa tomografia) zachodzi konieczność ich chłodzenia helem, co znacząco zwiększa koszty. Poszerzający się zakres zastosowań taśm nadprzewodnikowych, wymusza prowadzenie badań nad ich parametrami w różnych warunkach zewnętrznych, w tym badania wpływu pola magnetycznego na wartość krytycznej gęstości prądu elektrycznego.

W opiniowanej pracy przedstawiono badania właściwości taśm nadprzewodnikowych, pierwszej i drugiej generacji, w funkcji wartości oraz zwrotu pola magnetycznego na nie działającego. W tym celu opracowano autorskie stanowisko pomiarowe, wykonano konieczne badania porównawcze oraz zweryfikowano przedstawione modele obliczeniowe. **Opiniowana praca mieści się w dyscyplinie naukowej "Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne", a temat rozprawy uważam za ważny zarówno pod względem naukowym, jak również poznawczym i praktycznym.**

Autor sformułował następującą tezę pracy:

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 początkowym.

Biorąc pod uwagę zawartość pracy teza jest sformułowana poprawnie. Określenie wpływu wartości i zwrotu pola magnetycznego względem taśmy nadprzewodzącej na wartość gęstości prądu krytycznego jest bardzo istotne z punktu widzenia projektanta urządzeń zawierających tego typu taśmy.

2. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 152 strony. Rozprawę podzielono na 7 rozdziałów, nie wliczając wykazu literatury oraz czterech załączników, które zostały zamieszczone na końcu rozprawy. Na początku rozprawy zamieszczono wykaz stosowanych skrótów i oznaczeń, w którym wyodrębniono symbole łacińskie i greckie. Bibliografia jest bogata i zawiera 166 pozycje, w tym 5 pozycji autorskich i współautorskich Doktoranta. Literatura jest poprawnie dobrana i cytowana oraz zawiera aktualne pozycje z zakresu badań związanych z nadprzewodnictwem.

We wstępie (rozdział 1) przedstawiono umotywowanie badań prowadzonych w ramach doktoratu, podano cel i tezę pracy oraz zakres i metodykę badań. Rozdział zawiera także informacje o założeniach początkowych oraz planowanych do wykonania czynnościach.

Rozdział 2 zawiera wprowadzenie do nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego. Oprócz rysu historycznego, opisano pokrótce trzy najważniejsze teorie związane z nadprzewodnictwem: Londonów, Ginzburga-Landaua oraz BSC (Bardeen, Cooper, Schrieffer). Opisano podział na nadprzewodniki I-go i II-go typu oraz scharakteryzowano wybrane materiały nadprzewodzące. W rozdziałach 2.5 i 2.6 przedstawiono definicje parametrów krytycznych, model stanu krytycznego oraz prawo potęgowe E-J. W ostatnim podrozdziale podano wybrane zastosowania przemysłowe nadprzewodników (szkoda, że Autor nie podjął się szerszego spojrzenia na potencjalne przyszłe zastosowania).

Rozdział 3 został poświęcony wysokotemperaturowym taśmom nadprzewodnikowym (HTS). Przedstawiono podział na taśmy pierwszej i drugiej generacji, a także wybrane metody produkcji taśm HTS, wskazując na różnice pomiędzy taśmami oraz wady i zalety poszczególnych metod produkcji. W podrozdziale 3.3 zamieszczono analizę porównawczą komercyjnie dostępnych taśm o szerokości 4 mm. W podrozdziale 3.4 przetestowano 6 różnych modeli opisujących anizotropię prądów krytycznych, z których 3 były modelami zaproponowanymi przez Autora. Podrozdział ten, ze względu na jego ważność, mógłby być lepiej opisany (w szczególności dotyczy to opisu samych modeli).

W rozdziale 4 opisano metodę bezparametryczną wyznaczania modeli numerycznych gęstości prądów krytycznych z danych pomiarowych. Metoda ta pozwala na odtworzenie gęstości prądu krytycznego na podstawie danych pomiarowych z uwzględnieniem wpływu pola własnego. Należy nadmienić, że została ona opracowana wspólnie z Instytutem Fizyki Technicznej Karlsruhe Institute of Technology (KIT), który należy do ścisłej czołówki uczelni technicznych w Europie i na Świecie. W rozdziale zamieszczono opis algorytmu działania metody oraz przedstawiono możliwości jej zastosowania w analizie 1D oraz 2D. Ważną częścią rozdziału jest wykazanie poprawności jej działania dla dwóch wybranych taśm nadprzewodnikowych: ASMC oraz SuperPower.

Ważną i wartościową częścią pracy jest opis autorskiego stanowiska pomiarowego w rozdziale 5. Jego budowa była jednym z celów pracy doktorskiej. W rozdziale przedstawiono istniejące rozwiązania (ich wady i zalety), jak i prace nad autorskim rozwiązaniem, w tym badania w standardzie PoC (Proof of concept), które miały potwierdzić funkcjonalność stanowiska. W celu jego zaprojektowania posłużono się zarówno uproszczonymi modelami analitycznymi magnesów w układzie Halbacha, jak i symulacjami numerycznymi z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Electronics Desktop. Praca zawiera opis zarówno pierwszej, jak i zmodyfikowanej (końcowej) wersji stanowiska do pomiarów zależności kątowej

prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$. Istotną częścią jest przeprowadzenie weryfikacji pomiarowej obliczeń rozkładu pola wewnątrz komory, a także wykonanie wstępnych pomiarów prądów krytycznych na gotowym stanowisku.

Rozdział 6 zawiera wyniki pomiarów taśm HTS w polu jednorodnym z wykorzystaniem opracowanego stanowiska pomiarowego. Analizę porównawczą przeprowadzono dla czterech taśm dwóch producentów. W podrozdziale przedstawiono zbiorcze wyniki pomiarów dla wszystkich badanych taśm. Otrzymane wyniki pomiarów prądów krytycznych dla różnych wartości i zwrotu wektora indukcji magnetycznej $I_c(B, \theta)$ stanowiły bazę do wykorzystania metody MBP. Rozdział zakończono analizą porównawczą zrealizowanych badań, w tym porównaniem z wynikami pomiarów referencyjnych wykonanych w KIT.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie badań przeprowadzonych w rozprawie, wnioski, subiektywny wykaz kluczowych osiągnięć oraz opis potencjalnych przyszłych badań.

Jeżeli chodzi o formatowanie tekstu, to praca jest dobrze zredagowana. Układ pracy także jest dobry. Kolejne rozdziały prezentują wyniki jako logiczny i spójny ciąg, ukierunkowany na realizację celów pracy i potwierdzenie założonej tezy. Problemem jest szyk i styl niektórych zdań, który w wielu miejscach mógłby być lepszy. Szereg błędów edytorskich (brakujące litery, niedokończone zdania) nieco przeszkadza w czytaniu i analizowaniu pracy. Także jakość wielu rysunków pozostawia nieco do życzenia (wielkość czcionki, rozmycie itd.). Czytając pracę odnośni się wrażenie, że była ona pisana w pośpiechu. Moim zdaniem można było bardziej szczegółowo opisać, istotne z punktu widzenia przedstawionych wyników badań, modele dla prądu krytycznego (rozdział 3.4) oraz metodę bezparametryczną (rozdział 4).

3. Ocena wartości naukowej rozprawy

3.1. Podstawowe założenia i wybór metod badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych

Badania wpływu pola magnetycznego na parametry krytyczne taśm wykonanych z nadprzewodnika wysokotemperaturowego (HTS) są niezwykle istotne z punktu widzenia projektanta urządzeń zawierających tego typu taśmy. W szczególności dotyczy to materiałów nadprzewodnikowych II-typu, gdzie występuje stan mieszany. W ciągu lat opracowano szereg metod pomiarowych wyznaczania parametrów krytycznych wykorzystujących do generowania pola magnetycznego w głównej mierze cewki lub układy cewek (często wykonanych z materiału nadprzewodzącego). Tego typu układy pomiarowe pozwalają na badania własności nadprzewodników w szerokim zakresie wartości indukcji magnetycznej, sięgającym kilkunastu Tesli (CERN, Durham University Superconducting Group). Niemniej jednak istnieje realna potrzeba wykonywania pomiarów zależności kątowej prądu krytycznego dla wartości indukcji magnetycznej poniżej 1 T. Tego typu zadania podjął się Autor w ramach swojej pracy doktorskiej. W celu wytworzenia jednorodnego pola magnetycznego postanowił wykorzystać układ magnesów trwałych w postaci cylindrycznej macierzy Halbacha. Zastosowanie magnesów trwałych jest rzadko spotykane w tego typu stanowiskach pomiarowych, głównie ze względu na niższe wartości uzyskanej indukcji magnetycznej w porównaniu do cewek elektromagnetycznych. Dodatkową trudność stanowiło uzyskanie w tego typu konstrukcji wartości indukcji magnetycznej w powietrzu równiej 0,5 T, co jest zadaniem bardzo trudnym. Autor podjął się więc ambitnego i istotnego problemu badawczego. W celu jego realizacji

wykonał szereg wstępnych obliczeń analitycznych oraz obliczeń numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Electronics Desktop w wersji 2D. Po przeprowadzeniu obliczeń projektowych powstała pierwsza wersja stanowiska pomiarowego, która została gruntownie przetestowana. Bazując na zdobytym doświadczeniu Autor wykonał drugą, znacznie ulepszoną wersję stanowiska, która posłużyła do pomiaru zależności kątowej prądów krytycznych dla czterech taśm HTS. **Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przyjęte przez Autora metody badawcze zostały dobrane poprawnie.**

3.2. Ocena sposobu rozwiązania zagadnienia

W celu udowodnienia postawionej przez siebie tezy pracy (*„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”*) Doktorant przeprowadził szereg badań eksperymentalnych i obliczeniowych. W pierwszym kroku, na podstawie dostępnych danych literaturowych dla wybranych taśm HTS, określił zakres wartości zewnętrznego pola magnetycznego pozwalający na wiarygodną ocenę jego wpływu na wartość prądu krytycznego I_c . Jednocześnie przeprowadził analizę wpływu kąta pola magnetycznego na wartość I_c . Dodatkowo dokonał porównania 6 różnych modeli parametrycznych do opisu zjawiska anizotropii w taśmach HTS. Analizie poddano trzy modele zaczerpnięte z literatury (KL - *Kim-like model*, MAA - *Magneto-Angular Anisotropy model*, PER - *Percolation model*) oraz, co istotne, trzy modele autorskie, oparte o funkcje hiperboliczne (KTH - *Kim-tanh*, KCH - *Kim-cosh*, KCP - *Kim-cosh-power*).

Powyższe analizy pozwoliły zarówno na wybór taśm do dalszych badań jak i na określenie wymagań względem stanowiska pomiarowego. Bazując na otrzymanych analizach, Autor zaprojektował (z wykorzystaniem metod obliczeń analitycznych i numerycznych) i wykonał stanowisko pomiarowe w dwóch krokach: jako wersję PoC (Proof of concept) oraz jako wersję docelową. W przypadku wersji PoC została wykonana weryfikacja pomiarowa przeprowadzonych obliczeń, co pozwoliło na sprawdzenie poprawności wykorzystanych modeli numerycznych. Na tej bazie wykonano drugie, ulepszone stanowisko pomiarowe, pozwalające na uzyskanie wartości indukcji magnetycznej 350 mT dla pełnego zakresu zmian kąta. Przeprowadzone z jego użyciem pomiary dla czterech wybranych taśm HTS pozwoliły na określenie zależności kątowej prądu krytycznego oraz wyznaczenie wartości wykładnika potęgowego n dla prawa potęgowego E-J. Bazując na otrzymanych wynikach Autor dokonał porównania badanych taśm HTS. Bardzo ciekawe i wartościowe jest porównanie wyników pomiarów dla taśmy SCS4050-AP uzyskanych na autorskim stanowisku z wynikami pomiarów przeprowadzonymi na stanowisku w Karlsruhe Institute of Technology w Niemczech. Otrzymane wyniki są zbliżone do siebie, co świadczy o poprawności przeprowadzonych badań.

Dodatkowym i, moim zdaniem, istotnym osiągnięciem pracy jest opracowanie we współpracy z Instytutem Fizyki KIT oryginalnej metody bezparametrycznej (MBP) pozwalającej na odtworzenie gęstości prądu krytycznego na podstawie danych pomiarowych z uwzględnieniem wpływu pola własnego. Opracowana metoda stanowi istotne wsparcie dla projektantów urządzeń zawierających taśmy HTS.

Podsumowując należy stwierdzić, że zaprezentowany w pracy doktorskiej sposób rozwiązania zagadnienia pomiaru zależności kątowej prądu krytycznego dla taśm nadprzewodnikowych HTS jest oryginalny i poprawny.

3.3. Osiągnięcia Autora i ocena wyników rozprawy

Autor podjął się trudnego zadania wyznaczenia zależności kątowej prądów krytycznych w HTS na autorskim stanowisku pomiarowym. Wykorzystał w tym celu dostępne w literaturze wyniki badań taśm nadprzewodnikowych, modele analityczne dla określenia wartości indukcji w cylindrycznej macierzy Halbacha, modele numeryczne oparte o metodę elementów skończonych 2D, technologię druku 3D oraz doświadczenie uzyskane w pracy z taśmami HTS, co świadczy o dobrej ogólnej wiedzy Doktoranta. Osiągnięcie zakładanych celów pracy wymagało dużego nakładu pracy, szczególnie od strony doświadczalnej. **Przedłożona praca doktorska świadczy o dobrym warsztacie naukowym mgr inż. Krzysztofa Habelok oraz wskazuje na jego umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych i inżynierskich.**

Do wartościowych cech rozprawy doktorskiej zaliczam:

- 1) Opracowanie dwóch wersji autorskiego stanowiska pomiarowego do charakteryzacji taśm HTS w jednorodnym polu magnetycznym, opisanego w rozdz. 5.
- 2) Przeprowadzenie pomiarów zależności kątowej prądu krytycznego na opracowanym stanowisku badawczym oraz ich zestawienie z systemem na Karlsruhe Institute of Technology (KIT).
- 3) Współudział, wraz z Instytutem Fizyki Technicznej z KIT, w opracowaniu metody bezparametrycznej MBP wykorzystywanej do analizy gęstości prądów krytycznych taśm HTS. Efektem tej współpracy była publikacja w czasopiśmie Superconductor Science and Technology (obecnie 100 pkt, ale samo czasopismo jest plasowane w Q1).
- 4) Opracowanie modelu numerycznego 2D w programie ANSYS.
- 5) Wykonanie pomiarów indukcji magnetycznej dla różnych temperatur magnesów trwałych.
- 6) Przeprowadzenie badań porównawczych czterech taśm w celu określenia charakterystyk użytecznych do wyboru punktu pracy.
- 7) Opracowanie i przetestowanie trzech autorskich modeli zależności kątowej (KTH – *Kim-tanh*, KCH – *Kim-cosh*, KCP – *Kim-cosh-power*) jako alternatywy do modelu KL (*Kim-like model*).

Podsumowując, przedstawione wyniki badań upoważniają do stwierdzenia, że **teza rozprawy została udowodniona oraz osiągnięto założony cel pracy**. Opracowane stanowisko badawcze i otrzymane wyniki pomiarów **stanowią oryginalny i wartościowy wkład Autora w tematykę badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości taśm nadprzewodnikowych**.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Mam pewne uwagi do strony redakcyjnej pracy doktorskiej. W trakcie jej czytania natrafiłem na sporą liczbę błędów stylistycznych oraz literówek. Być może jest to wynikiem pośpiechu związanego z finalizacją pracy, niemniej jednak wpływa na jakość i odbiór pracy. Zamieszczone w pracy rysunki również są różnej jakości (np. wykresy nie są ujednolicone – różne wielkości czcionek, różne style linii itd.). Poniżej zamieszczam wybrane uwagi szczegółowe (na które nie wymagam odpowiedzi od Autora):

- 1) Brakuje powołania na pozycje [1] literatury.
- 2) W rozdziale 1.3 w punkcie 1 na stronie 17 wymieniono 6 taśm do badania, natomiast na stronie 108 zbadano jedynie 4. Brakuje komentarza, dlaczego z początkowo planowych 6 taśm zbadano tylko 4?

- 3) Str. 29, ostatnie zdanie przed rys. 2.4 – „Widoczne jest, że połączenie między elektronami powstaje przy temperaturze mniejszej od T_c ”. Słowo widoczne w tym miejscu dotyczy rys. 2.4, ale jest to tylko poglądowy rysunek. Powinno się tu znaleźć bardziej inżynierskie wytłumaczenie, np. „Przy temperaturze mniejszej od T_c staje się możliwe powstawanie par Coopera”.
- 4) Rys. 2.5 – na osi odciętych powinno być tylko „M”.
- 5) Str. 38, ostatnie zdanie w pierwszym akapicie jest niezrozumiałe.
- 6) Str. 39, wzór (2.26) – w wykładniku powinno być „b”.
- 7) Str. 40, rozdz. 2.6.1, drugie zdanie w drugim akapicie jest niezrozumiałe.
- 8) Rys. 2.15 – rysunek kiepskiej jakości. Według mnie można było zrobić samemu lepszy.
- 9) Str. 45 - tekst oraz rys. 2.18 są wyrwane z kontekstu.
- 10) Rozdz. 2.7.5 – systemy transportowe oparte o lewitację z nadprzewodnikami są jednak jeszcze dalekie od wdrożenia w praktyce. Ostatni akapit brzmi jakby był wyjęty z folderu reklamowego.
- 11) Str. 61 – zamieszczona treść mogłaby być osobnym podrozdziałem.
- 12) Str. 65, drugi akapit pod rys. 3.18 powinien być połączony z kolejnym.
- 13) Str. 66 i 67, rys. 3.19 i 3.20 mają różne rozmiary czcionek.
- 14) Str. 71, trzecie zdanie od końca – w rozdziale 4.3 nie ma przedstawionych modeli gęstości prądu, a jedynie zastosowanie MBP w analizach 1D (tylko 1 strona).
- 15) Rozdział 4.4 wydaje się być wyrwany z kontekstu. Przedstawione w nim wyniki bazują na danych innych autorów. Według mnie mógłby być on wprowadzeniem do rozdz. 4.
- 16) Str. 86 - wniosek w drugim akapicie jest dość oczywisty, jeżeli zna się parametry magnesów z ziem rzadkich.
- 17) Str. 86, rys. 5.5 – na osi 'x' powinno być oznaczenie „ d_1 ”.
- 18) Str. 87, ostatni akapit – w magnetostatyce nie ma pojęcia „fale elektromagnetyczne”!
- 19) W jednym miejscu Autor stosuje oznaczenie odległości d_{31} , a w innym d_{3-1} . Brakuje tu konsekwencji.
- 20) Str. 88, akapit przed rys. 5.8 – „gęstość strumienia magnetycznego” i „indukcja magnetyczna” to jest ta sama wielkość fizyczna.
- 21) Rys. 5.8 i 5.9 – bardzo słabo czytelna czcionka na skali indukcji magnetycznej.
- 22) Str. 94, ostatnie zdanie jest niezrozumiałe: „Dokonano zapewniono dokonanie pomiarów pełnego obrotu w zakresie 0° - 360° .”
- 23) Str. 99, drugi akapit – ostatnie zdania są niezrozumiałe.
- 24) Str. 103, ostatnia linia – zamiast „wartości 0° - 255° ” ma być „0-255 poziomów”.
- 25) Str. 108, pierwszy akapit – lepiej byłoby wymienić badane taśmy w punktach.
- 26) Rysunki 6.4, 6.6 i 6.8 – błąd w podpisie, gdyż zamiast „...wykładnika potęgowego...” powinno być „... $J_c(B, \theta)$ ”
- 27) Str. 115, rys. 6.10 – zbyt mała czcionka.
- 28) Str. 119, ostatnie zdanie drugiego akapitu – „...może być zmienna w czasie” (!?) Nie wiadomo o co chodzi.
- 29) Str. 120, drugie zdanie drugiego akapitu – jest „Na Rys. 6.14...”, a powinno być „Na rys. 6.15...”.
- 30) Rys. 6.14 – czytelniejsze byłoby porównanie taśm między sobą na jednym wykresie.
- 31) Rozdz. 7.3 jest praktycznie skróconym powtórzeniem rozdz. 7.2.
- 32) Str. 126 – uzyskanie 1 T w układzie z magnesami trwałymi będzie bardzo trudne. Póki co jest 0.35 T, a więc ledwie 1/3 wartości.

- 33) Literatura – błędy edytorskie w opisie pozycji [42] („...I i II...”), [43] (duża czcionka autorów), [134] (brak danych bibliograficznych), [144] i [165].
- 34) Str. 146 – powołanie na „Rys. ??”.
- 35) Rysunki C.1 i C.2 – brak opisu osi!
- 36) W kodzie źródłowym na stronie 151 powinny być wcięcia, aby był on bardziej czytelny.

Po lekturze rozprawy nasunęły mi się także pewne **uwagi dyskusyjne oraz pytania**. Uwagi te nie wpływają na moją ocenę końcową, jednak prosiłbym Pana mgr inż. Krzysztofa Habeloka o ustosunkowanie się do nich:

- 1) Str. 50, ostatnie zdanie – co to jest za jednostka [$\$/kAm$]?
- 2) Str. 53 - prosiłbym o przedstawienie rysunku, na którym będzie zaznaczone położenie taśmy prostopadłe i równoległe do pola.
- 3) Dlaczego do doboru parametrów modeli wykorzystano algorytm optymalizacyjny *Bat Algorithm*, a nie np. algorytm genetyczny lub inny? (str. 64)
- 4) Proszę o wyjaśnienie oznaczeń L1E1, L1E2, L2E1 oraz L2E2 (Rys. 3.18).
- 5) Str. 66, tabela 3.2 – dla funkcji celu L2 zaznaczono na zielono wartość 44.33, ale w tabeli są mniejsze wartości (np. dla modelu MAA otrzymujemy 27.65). Z czego to wynika?
- 6) Dość pobieżnie wyjaśniono metodę bezparametryczną (rozdz. 4.2). Prosiłbym o jej bardziej precyzyjne wyjaśnienie w odniesieniu do badanych taśm nadprzewodzących. W szczególności prosiłbym o przygotowanie rysunku, na którym będą oznaczone wielkości pojawiające się we wzorach (4.3).
- 7) Czy wykresy na rys. 4.5 dotyczą przypadku $y=0$?
- 8) Na str. 77 znajduje się zdanie „W procedurze wykorzystywane są wyłącznie dane pomiarowe, które są modyfikowane iteracyjnie tak, aby uwzględnić wpływ pola własnego”. Czy modyfikowane są dane z modelu matematycznego, czy dane pomiarowe? Ta druga opcja wydaje się nieco dziwna.
- 9) Prosiłbym o wyjaśnienie kąta θ we wzorze (5.1).
- 10) Czy autor mógłby przedstawić rysunek 3D układu magnesów w stanowisku pomiarowym?
- 11) Otrzymane na rys. 5.15 różnice między wartością indukcji magnetycznej dla różnych temperatur są istotnie wyższe niż przy pomiarze czujnikiem Hala CYSJ362A (rys. 5.17). Czy sonda THS-TB51 nadaje się do pracy w temperaturze 77 K?
- 12) Nie do końca rozumiem sens nazywania wykresów 2D i 3D modelami (np. rys. 5.21, 5.23, 6.10). Wykres ma zupełnie inne znaczenie niż model. Przedstawienie tych samych wyników modelowania gęstości prądu krytycznego w postaci mapy 2-wymiarowej, albo wykresu 3-wymiarowego nie znaczy, że mamy do czynienia z modelem 2-wymiarowym albo 3-wymiarowym. Prosiłbym o wyjaśnienie zastosowanego nazewnictwa.
- 13) Czy wektory magnetyzacji na rys. 5.24 przedstawiono poprawnie? Wszystkie są skierowane na zewnątrz, czyli wewnątrz nie będzie pola magnetycznego jednorodnego.
- 14) Nie do końca rozumiem wykorzystanie rozpoznawania obrazów do akwizycji danych pomiarowych (str. 103). Czy nie prościej byłoby zastosować klasyczny układ akwizycji DAQ, zwłaszcza, że zarówno zasilacz, jak i mikrowoltomierz mają odpowiednie wyjścia?
- 15) Na str. 124 autor pisze, że osiągnięto cel pracy zakładający charakteryzację taśm HTS w polach do 0.5 T. W praktyce osiągnięto wartość indukcji magnetycznej równą 0.35 T. Skąd ten wniosek?

- 16) Str. 124, czwarty punkt wniosków, ostatnie zdanie – co oznacza „...niestety model jest ograniczony tylko do jednej taśmy”? Czy chodziło o ograniczenie zastosowania do jednego rodzaju taśmy HTS? Prosiłbym o wyjaśnienie.

5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę aktualność prowadzonych badań i stosunkowo wysoki poziom trudności rozwiązywanych problemów praktycznych, a także jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską, pomimo pewnych uwag stwierdzam, że **spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023r. poz. 742 z późn. zm.)**. Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Habelok do publicznej obrony Jego rozprawy.

.....
Dr hab. inż. Andrzej Waindok