



Politechnika
Śląska

Politechnika Śląska

Wydział Elektryczny

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Krzysztof Habelok

Badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego
na właściwości taśm nadprzewodnikowych

Promotor: dr hab. inż. Mariusz Stępień, Prof. Pol. Śl.

Gliwice 2024

Spis treści

Oznaczenia	7
Nazewnictwo	8
Streszczenie	9
Abstract	11
1. Wstęp	13
1.1. Motywacja	15
1.2. Cel i teza pracy	16
1.3. Zakres i metodyka badań	17
1.4. Struktura pracy	18
2. Podstawy nadprzewodnictwa	21
2.1. Historia nadprzewodnictwa	22
2.2. Wybrane teorie nadprzewodnictwa	24
2.2.1. Teoria Londonów	25
2.2.2. Teoria Ginzburg-Landau	26
2.2.3. Teoria BSC	28
2.3. Podział nadprzewodników na I-typu i II-typu	29
2.4. Materiały nadprzewodnikowe	32
2.4.1. Materiały niskotemperaturowe LTS	32
2.4.2. Materiały wysokotemperaturowe HTS	34
2.4.3. Anizotropia	35
2.5. Parametry krytyczne	36
2.5.1. Temperatura krytyczna T_c	36
2.5.2. Krytyczne natężenie pola magnetycznego H_c	38
2.5.3. Krytyczna gęstość prądu J_c	38
2.6. Modelowanie właściwości nadprzewodników	40
2.6.1. Model Stanu Krytycznego	40

2.6.2. Prawo potęgowe E-J	41
2.7. Zastosowania nadprzewodników HTS	42
2.7.1. Kable nadprzewodnikowe	43
2.7.2. Silniki i generatory nadprzewodnikowe	44
2.7.3. Transformatory	46
2.7.4. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu	47
2.7.5. Systemy transportowe	48
3. Wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe HTS	49
3.1. Podział taśm HTS	50
3.2. Przegląd metod produkcji taśm HTS	51
3.3. Zależności kątowne prądu krytycznego wybranych taśm HTS	53
3.3.1. American Superconductor	54
3.3.2. Shanghai Superconductor	55
3.3.3. SuNAM 2G HTS Wire	56
3.3.4. SuperOx 2G HTS	58
3.3.5. SuperPower Advanced Pinning	59
3.3.6. THEVA Pro-Line 2G HTS	60
3.4. Modele kątowne prądu krytycznego I_c	63
3.5. Podsumowanie rozdziału	69
4. Metoda bezparametryczna	71
4.1. Wprowadzenie	72
4.2. Istota metody bezparametrycznej	74
4.3. Zastosowanie MBP w analizach 1D	78
4.4. Zastosowanie MBP w analizach 2D	79
4.5. Podsumowanie	80
5. Stanowisko do charakteryzacji taśm HTS	81
5.1. Metody charakteryzacji taśm HTS	82
5.2. Wytwarzanie jednorodnego pola magnetycznego	84
5.3. Opis analityczny rozkładu indukcji magnetycznej	85
5.4. Modelowanie rozkładu pola w układzie Halbacha	87
5.4.1. Modelowanie z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB	87
5.4.2. Modelowanie z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS	87

5.5. Stanowisko badawcze - projekt i realizacja	91
5.6. Pomiar pola magnetycznego	93
5.7. Pomiar wstępny prądów krytycznych	96
5.8. Wprowadzenie usprawnień mechanicznych	101
5.9. Półautomatyczny system pomiaru prądu krytycznego	103
5.10. Podsumowanie	105
6. Charakterystyka taśm HTS polu jednorodnym	107
6.1. Wybór i przygotowanie próbek taśm HTS	108
6.2. Pomiar zależności kątowej prądu krytycznego	109
6.3. Modele gęstości prądów analizowanych taśm HTS	115
6.4. Dyskusja	118
7. Podsumowanie	123
7.1. Podsumowanie badań	123
7.2. Wnioski	124
7.3. Kluczowe osiągnięcia	125
7.4. Potencjał przyszłych prac badawczych	126
Bibliografia	127
Załączniki	139
A. Załącznik A	139
A.1. Lista publikacji	139
B. Załącznik B	141
B.1. Wybrane wyniki pomiarów	141
B.1.1. Wyniki porównania modeli prądu krytycznego taśm HTS	141
B.1.2. Porównanie modeli numerycznych dla poszczególnych taśm	144
B.1.3. FH 51 wyniki pomiarów pola magnetycznego	145
B.1.4. Czujnik Hala CYSJ362A GaAs wyniki pomiarów pola magnetycznego	146
C. Załącznik C	147
C.1. Klasyczna metoda wyznaczania niepewności pomiarowych	147
C.2. Metoda wyznaczania niepewności dopasowania funkcji nieliniowej przy mocy funkcji <i>curve_fit</i> [1]	149

D. Załącznik D	151
D.1. Kod źródłowy metody MBP 1D	151

Nazewnictwo

Symbole łacińskie

Symbol	Jednostka	Opis
A	Wb	Magnetyczny potencjał wektorowy
B	T	Wektor indukcji magnetycznej
D	C/m^2	Wektor indukcji elektrycznej
E	V/m	Wektor pola elektrycznego
F _{pinning}	N	Siła przyczepności
J	A/m^2	Gęstość prądu
H	A/m	Wektor natężenia pola magnetycznego
v _s	m/s	Prędkość nadprzewodzących elektronów
<i>d</i> ₁	m	Średnica wewnętrzna układu <i>d</i> ₁
<i>d</i> ₂	m	Średnica zewnętrzna układu <i>d</i> ₂
<i>d</i> ₃	m	Maksymalny rozstaw magnesów <i>d</i> ₃
<i>r</i>	m	Promień
<i>B</i> _c	T	Krytyczna gęstość strumienia magnetycznego
<i>B</i> _{c0}	T	Krytyczna gęstość strumienia magnetycznego
<i>B</i> _{c1}	T	Indukcja magnetyczna dolnego pola krytycznego
<i>B</i> _{c2}	T	Indukcja magnetyczna górnego pola krytycznego
<i>B</i>	T	Gęstość strumienia magnetycznego równoległa do płaszczyzny a-b
<i>B</i> _⊥	T	Gęstość strumienia magnetycznego prostopadła do płaszczyzny a-b
<i>H</i> _c	A/m	Krytyczna wartość natężenia pola magnetycznego
<i>H</i> _{c1}	A/m	Pierwsze krytyczne natężenie pola magnetycznego
<i>H</i> _{c2}	A/m	Drugie krytyczne natężenie pola magnetycznego
<i>I</i> _e	A	Prąd ekranujący
<i>I</i> _t	A	Prąd transportu
<i>I</i> _c	A	Prąd krytyczny
<i>J</i> _c	A/m^2	Krytyczna gęstość prądu
<i>J</i> _{c0}	A/m^2	Krytyczna gęstość prądu w stanie 0
<i>M</i>	$A \cdot m^2$	Moment magnetyczny
<i>n</i>		Wykładnik prawa potęgowego E-J
<i>R</i>	Ω	Rezystancja
<i>T</i>	K or °C	Temperatura
<i>T</i> _c	K or °C	Temperatura krytyczna
<i>U</i>	V	Napięcie
<i>U</i> _c	V	Napięcie krytyczne
<i>U</i> _{DC}	V	Napięcie DC

¹Teoretyczna wartość obliczona dla $T = 0$ K oraz $J = 0$ A/mm²

Akronimy

Symbol	Opis
1G	Taśmy pierwszej generacji
2G	Taśmy drugiej generacji
AMSC	American Superconductor
Bi2223	Nadprzewodnik $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$
BiSCCO	Nadprzewodnik $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$
BSC	Teoria BSC (Bardeen-Cooper-Schrieffer Theory)
CSM	Model Stanu Krytycznego
GL	Teoria Ginzburga-Landau
HTS	Nadprzewodnik wysokotemperaturowy (High Temperature Superconductor)
IBAD	Metoda osadzania fazy gazowej (Ion-Beam-Assisted Deposition)
ISD	Metoda osadzania fazy gazowej (Inclined Substrate Deposition)
KCH	Model prądu krytycznego Kim-cosh
KCP	Model prądu krytycznego Kim-cosh-power
KL	Model prądu krytycznego Kim-like
KTH	Model prądu krytycznego Kim-tanh
LHe	Ciekły hel
LN	Ciekły azot
LTS	Nadprzewodnik niskotemperaturowy (Low Temperature Superconductor)
MAA	Model prądu krytycznego (Magneto-Angular Anisotropy)
MBP	Metoda bezparametryczna
MgB2	Dwuborek magnezu
MOCVD	Techniką wzrostu epitaksjalnego (Metalorganic Chemical Vapour Deposition)
NdFeB	Oznaczenie magnezu neodymowego (Yttrium Barium Copper Oxide)
NbTi	Nadprzewodnik niskotemperaturowy (Niobium-Titanium)
Nb3Sn	Nadprzewodnik niskotemperaturowy (Niobium-Tin)
OCR	Technika rozpoznawania obrazów (Optical Character Recognition)
OX, OY, OZ	Oznaczenie osi układu współrzędnych
PIT	Technologia rurkowo-proszkowa (Powder-In-Tube)
PLA	Filament wykonany z polilaktydu do druku 3D
PLD	Metoda osadzania fazy gazowej (Pulsed Laser Deposition)
PM	Magnes trwały (Permanent magnets)
PoC	Metoda potwierdzenia koncepcji (Proof of Concept)
RABiTS	Metoda wytwarzania podłoża (Proces wytwarzania przewodów Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates)
SmCo	Magnezy samarowo-kobaltowe (Samarium Cobalt Magnet))
YBCO	Nadprzewodnik $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Y123)

Greckie symbole

Symbol	Jednostka	Opis
ρ	Ωm	Rezystywność
δ	m	Głębokość wnikania
Δ		Dyskretyzator wielomianu
μ	H/m	Przenikalność magnetyczna
μ_0	H/m	Przenikalność magnetyczna próżni
μ_r		Względna przenikalność magnetyczna
ϕ	Wb	Strumień magnetyczny
ξ		Współczynnik tłumienia
ε	F/m	Przenikalność elektryczna
ε_0	F/m	Przenikalność elektryczna próżni
ε_r		Względna przenikalność magnetyczna
λ		Parametr Londona
α		Parametr temperaturowy
β		Parametr materiałowy
γ		Współczynnik anizotropii
κ		Parametr Ginzburga-Landau
Ψ		Funkcja falowa
Ω	Ω	Jednostka rezystancji
θ	°	Kąt obrotu taśmy względem pola magnetycznego
ζ		Współczynnik tłumienia
κ		Współczynnik proporcjonalności
σ	S/m	Konduktancja
χ		Susceptancja magnetyczna
v		Prędkość
π		Stała matematyczna
ρ_m	kg/m ³	Gęstość masy
ϵ		Parametr anizotropii taśmy
σ		Gęstość prądu powierzchniowego

Streszczenie

Niniejsza praca doktorska dotyczy badań w zakresie zastosowania technologii nadprzewodnikowych w zaawansowanych systemach elektroenergetycznych. Szczególną uwagę poświęcono badaniu podstawowych właściwości materiałów nadprzewodnikowych, w szczególności taśm nadprzewodnikowych, pierwszej i drugiej generacji w zewnętrznych polach magnetycznych.

Implementacja technologii nadprzewodnikowych w urządzeniach elektrycznych ma duży potencjał do usprawnienia funkcjonowania współczesnych systemów elektroenergetycznych między innymi poprzez zwiększenie gęstości mocy, umożliwienie bezstratnego przesyłu energii na duże odległości oraz ograniczenie prądów zwarciovych. Wdrożenie technologii nadprzewodnikowych do codziennego użytku może zrewolucjonizować współczesne systemy elektroenergetyczne i transport.

Przedmiotem badań przedstawionych w niniejszej pracy doktorskiej jest charakteryzacja prądowa wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych. W pracy uwzględniono wpływ zewnętrznego pola magnetycznego (amplitudy i kąta) na redukcję prądów krytycznych I_c . Jest to istotne ograniczenie, które znacząco wpływa na wykorzystanie materiałów nadprzewodnikowych w aplikacjach przemysłowych.

W pracy zastosowano typowe podejście naukowe, rozpoczynając od charakteryzacji podstawowych właściwości taśm nadprzewodnikowych, następnie, na podstawie dostępnych w literaturze danych pomiarowych przeprowadzono porównanie charakterystyk kątowych wybranych taśm nadprzewodnikowych. Przedstawiono wyniki badań numerycznych, w których zaprezentowano autorską metodę bezparametryczną (MBP) analizy właściwości modeli taśm HTS, pozwalającą na oszacowanie gęstości prądów krytycznych na podstawie danych pomiarowych.

Porównano znane z literatury systemy pomiarowe wykorzystywane do charakteryzacji taśm nadprzewodnikowych oraz zaproponowano koncepcję autorskiego stanowiska pomiarowego, wykonano oraz przetestowano zaproponowane stanowisko pomiarowe wykorzystując technologię druku 3D do wytworzenia elementów konstrukcyjnych stanowiska.

Metodologia pracy obejmuje analizę literatury, metaanalizę danych pomiarowych z innych systemów, badania analityczne i numeryczne, a także projektowanie oraz testowanie autorskiego rozwiązania stanowiska do charakteryzacji taśm w cylindrycznej strukturze magnesów trwałych w układzie Halbacha. Wyniki zaprezentowane w pracy dotyczą trzech głównych obszarów: charakterystyki taśm nadprzewodnikowych i ich modeli gęstości prądów, zastosowania metody bezparametrycznej (MBP) oraz zaprojektowania stanowiska testowego, za pomocą którego przeprowadzono pomiary.

Abstract

This doctoral dissertation focuses on research into the application of superconducting technologies in advanced power systems. Special attention is given to the investigation of the fundamental properties of superconducting materials, particularly first and second-generation superconducting tapes, in external magnetic fields.

The implementation of superconducting technologies in electrical devices has significant potential to enhance the operation of modern power systems, including increasing power density, enabling lossless energy transmission over long distances, and reducing short-circuit currents. The adoption of superconducting technologies in everyday use could revolutionize contemporary power systems and transportation.

The subject of the research presented in this dissertation is the characterization of the current properties of high-temperature superconducting tapes. The work considers the impact of the external magnetic field (its amplitude and angle) on the reduction of critical currents, I_c . This is a significant limitation that greatly affects the use of superconducting materials in industrial applications.

The dissertation follows a typical scientific approach, beginning with the characterization of the fundamental properties of superconducting tapes. Based on measurement data available in the literature, a comparison of the angular characteristics of selected superconducting tapes was then conducted. Subsequently, numerical research results were presented, showcasing an original non-parametric method (MBP) for analyzing the properties of HTS tape models, which allows for the estimation of critical current densities based on measurement data.

Measurement systems known from the literature, used for the characterization of superconducting tapes, were compared, and a concept for an original measurement setup was proposed. The proposed measurement setup was constructed and tested, utilizing 3D printing technology to produce its structural components.

The methodology of this work includes literature analysis, meta-analysis of measurement data from other systems, analytical and numerical studies, as well as the design and testing of an original solution for a setup to characterize tapes in a cylindrical structure of permanent magnets arranged in a Halbach array. The results presented in the dissertation pertain to three main areas: the characteristics of superconducting tapes and their current density models, the application of the non-parametric method (MBP), and the design of a test setup used to conduct measurements.

1

Wstęp

W dobie rosnącego zapotrzebowania na produkcję energii elektrycznej oraz jednocześnie ogólnoświatowego trendu dążenia do ograniczenia negatywnego wpływu technologii na środowisko, poszukiwanie nowych, efektywniejszych i bardziej zrównoważonych metod produkcji, przesyłu oraz wykorzystania energii staje się kluczowym wyzwaniem naszych czasów [2, 3]. Transformacja energetyczna, związana między innymi z odchodzeniem od paliw kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii, wymaga innowacyjnych rozwiązań w wielu obszarach życia, w tym także innowacyjnego podejścia wykorzystującego właściwości nowoczesnych materiałów. Jednym z obszarów naukowych, którego rozwój umożliwiłby inne spojrzenie na zagadnienia produkcji energii, jej przesyłu oraz wykorzystania w maszynach, kablach, urządzeniach i systemach elektroenergetycznych, jest nadprzewodnictwo [4–6].

Intensywne prace badawcze w zakresie wykorzystania nadprzewodnictwa w aplikacjach elektroenergetycznych są prowadzone w czołowych ośrodkach naukowych na świecie [7, 8]. Głównym celem tych badań jest wykorzystanie właściwości materiałów, dzięki którym można zwiększyć efektywności urządzeń oraz ograniczyć straty mocy. Materiały nadprzewodnikowe wykorzystywane w urządzeniach elektrycznych cechują się ponadto zwiększoną gęstością mocy oraz możliwością generowania dużych pól magnetycznych sięgających kilku tesli [9].

Nadprzewodnictwo jest szerokim obszarem badawczym, obejmującym swoim zasięgiem badania fundamentalne z różnych obszarów nauki takich jak fizyka, materiałoznawstwo, kriogenika, elektrotechnika czy chemia. Ponadto istotnym obszarem są badania teoretyczne i numeryczne oraz praktyczne opracowania demonstratorów technologicznych potwierdzających użyteczność materiałów w warunkach rzeczywistych.

Urządzenia nadprzewodnikowe będące częścią systemu elektroenergetycznego, takie jak transformatory, generatory, nadprzewodnikowe ograniczniki prądu czy linie przesyłowe mogą skutecznie zastąpić obecne rozwiązania oraz zmienić podejście do elektroenergetyki lub z powodzeniem tworzyć z obecnymi systemami rozwiązania hybrydowe [10, 11].

Do produkcji każdego z wyżej wymienionych urządzeń niezbędne jest zastosowanie materiałów nadprzewodnikowych, wśród których najczęściej wykorzystuje się przewody nawojowe między innymi w postaci taśm. W większości aplikacji następuje zamiana

standardowych przewodów, miedzianych lub aluminiowych na nadprzewodnikowe. Wśród nich można wyróżnić wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe (ang. High-Temperature Superconductors, HTS), które są przedmiotem badań w niniejszej pracy.

Pomimo faktu, iż technologia wytwarzania taśm wysokotemperaturowych nie jest w fazie początkowego rozwoju to w dalszym ciągu pozostaje wiele obszarów technicznych do usprawnienia. W związku z tym istotne jest prowadzenie badań prowadzących do lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w materiałach, poprawy ich właściwości oraz uzyskania informacji niezbędnych przy projektowaniu oraz modelowaniu urządzeń wykorzystujących taśmy nadprzewodnikowe.

Istnieje wiele różnych metod produkcji taśm HTS, co przekłada się na ich różne właściwości tj. wytrzymałość mechaniczną, promień gięcia, szerokość, grubość, straty mocy, w tym zmienność prądową, a w szczególności wpływ zewnętrznego pola magnetycznego na wartość prądu krytycznego. Komercyjnie dostępne taśmy HTS, które są przedmiotem badań w pracy, cechują się różną konstrukcją, sposobem nanoszenia cienkowanostkowych powłok, wewnętrzną budową oraz materiałami użytymi w procesie produkcji, co istotnie wpływa na właściwości taśm. Podstawowymi parametrami cechującymi nadprzewodniki są ich parametry krytyczne: gęstość prądu J_c , indukcja magnetyczna B_c oraz temperatura T_c .

Na przestrzeni ostatnich lat opracowano szereg modeli numerycznych, które pozwoliły na lepsze zrozumienie zjawisk fizycznych zachodzących w taśmach i ułatwiły ich wykorzystanie w aplikacjach przemysłowych [12–15]. Modele te dają projektantom urządzeń nadprzewodnikowych narzędzia umożliwiające opracowanie nowych układów oraz dostarczają informacji o zjawiskach zachodzących w materiałach.

W niniejszej pracy opisano podstawowe rodzaje taśm HTS stosowanych w urządzeniach nadprzewodnikowych, w szczególności pracujących zewnętrznym polu magnetycznym. Dokonano analizy taśm różnych producentów pod kątem budowy, metod produkcji, wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na wartość prądu krytycznego, który jest jednym z czynników limitujących wykorzystanie taśmy. Porównano dostępne modele zależności kątowej gęstości prądu krytycznego oraz zaproponowano własne rozwinięcia modeli o funkcje hiperboliczne.

W pracy wykorzystano także narzędzia symulacji komputerowej, takie jak ANSYS oraz MATLAB, do badania zjawisk zachodzących w taśmach HTS. Ponadto w pracy przedstawiono wykorzystanie autorskiego narzędzia wykorzystywanego w procesie symulacji, które zostało opracowane wspólnie w zespole badawczym w 2017 roku i które jest często wykorzystywane przy modelowaniu właściwości taśm HTS [16].

Najważniejszą częścią pracy jest przeprowadzenie badań wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na parametry krytyczne taśm HTS wykonanych w dedykowanych, autorskich stanowiskach badawczych. Koncepcja wykorzystania cylindrycznego układu magnesu trwałych Halbacha w zakresie generowania zewnętrznego pola magnetycznego, stanowi prostą alternatywę do obecnie stosowanych systemów pomiarowych.

1.1. Motywacja

W Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej od wielu lat prowadzone są badania z zakresu zastosowania nadprzewodnictwa w urządzeniach elektrycznych i elektroenergetycznych, skupiające się nad połączeniem metod laboratoryjnych z narzędziami symulacji komputerowej [17]. Powstały liczne prace dotyczące transformatorów nadprzewodnikowych [18], metod pomiaru [19], pomp pola [20], badaniami właściwości taśm i ich układów oraz prace związane z zastosowaniem modelowania numerycznego [21, 22]. Naturalną kontynuacją tych prac są prace związane z badaniem samych taśm nadprzewodnikowych HTS, które są tematem niniejszej pracy.

Bezpośrednią motywacją do podjęcia badań była potrzeba pogłębienia wiedzy na temat właściwości taśm nadprzewodnikowych, zjawisk w nich zachodzących oraz modeli numerycznych wykorzystywanych do projektowania urządzeń. W szczególności skupiono się na aplikacjach elektroenergetycznych i oddziaływaniu pól magnetycznych występujących w standardowych urządzeniach tego typu, czyli takich, których wartość pola magnetycznego nie przekracza 500 mT.

Motywacją do przeprowadzenia badań była potrzeba opracowania własnego układu do charakteryzacji taśm HTS umożliwiającego zrealizowanie badań porównawczych, w szczególności badań wpływu pola magnetycznego na anizotropowe materiały HTS. Skupiono się nad zależnością kątową prądu transportu oraz gęstości prądu w taśmach. Uwzględniono wpływ prądów ekranujących przy niskich polach magnetycznych oraz redukcję użytecznej wartości prądu krytycznego I_c .

Potrzeba zbudowania własnego stanowiska pomiarowego cechującego się mobilnością, łatwością wykonania były kolejną motywacją do opracowania stanowisk badawczych. Mobilność stanowisk badawczych oraz minimalizacja aparatury pomiarowej niezbędnej do przeprowadzenia badań stanowiły podstawę koncepcji stanowisk.

Dokładne zrozumienie wpływu anizotropii magnetycznej na wartości prądów krytycznych uzasadnia prowadzenie badań, tym bardziej, że opracowane w ramach pracy narzędzia mogą stać się użyteczne i być implementowane w modelach numerycznych wykorzystywanych w przez społeczność akademicką, a zaproponowane konstrukcje stanowisk badawczych mogą się przyczynić do łatwiejszego prowadzenia badań związanych z charakteryzacją taśm. Ponadto proponowane konstrukcje można w łatwy sposób skalować w celu uzyskania innych parametrów technicznych.

1.2. Cel i teza pracy

Liczne prace badawcze dotyczące modelowania właściwości taśm nadprzewodnikowych HTS, które powstały w ostatnich latach oraz modele numeryczne wykorzystujące komercyjnie dostępne taśmy wskazują na wzrost zainteresowania tematyką i próbę opracowania narzędzi ułatwiających proces projektowania urządzeń HTS [23–26]. To właśnie skuteczne i powtarzalne procesy weryfikacyjne mogą przyczynić się do szybszego prototypowania urządzeń HTS. Narzędzia symulacyjne umożliwiają niejednokrotnie wyznaczenie wielkości, które są pomiarowo trudno dostępne. Jednym z takich parametrów jest wartość gęstości krytycznej J_c , którą to można wyznaczyć bazując na pomiarach prądów krytycznych I_c .

Celem niniejszej pracy jest zrealizowanie badań uwzględniających wykonanie pomiarów zależności kątowej prądów krytycznych oraz opracowanie modeli numerycznych dla taśm pracujących w niskich polach magnetycznych, bliskich polu własnemu, wynikającemu z prądów ekranujących. Zakłada się, że do zrealizowania badań zostanie opracowane nowe stanowisko pomiarowe bazujące na magnesach trwałych w układzie cylindrycznej macierzy Halbacha, umożliwiające wytworzenie jednorodnego pola magnetycznego w obszarze taśmy.

Modele numeryczne dotyczące zależności kątowej taśm HTS, bazujące na zastosowaniu modeli Kima [27] są niewystarczające do odwzorowania zależności taśm HTS 2G (drugiej generacji) w szczególności w polach magnetycznych do wartości 0,5 T, co zostanie szczegółowo opisane w rozdziale 3. Z uwagi na to konieczne jest opracowanie metod pozwalających odwzorować gęstość prądu w taśmach oraz pozwalających odtworzyć kątową zależność prądów krytycznych. W ramach przeprowadzonych prac badawczych postawiono następującą tezę, której udowodnienie jest jednym z celów 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.

Zatem głównym celem rozprawy jest wykazanie poprawności tezy czyli przedstawienie koncepcji i jej zweryfikowanie eksperymentalne poprzez wykonanie następujących czynności:

- Dokonanie analizy zależności kątowej prądu krytycznego w taśmach HTS w oparciu o ogólnodostępną bazę danych pomiarowych;
- Przebadanie wybranych modeli zależności kątowej prądu w taśmach HTS;
- Opracowanie metody bezparametrycznej MBP oraz przetestowanie jej na dostępnych danych pomiarowych;
- Opracowanie koncepcji stanowisk pomiarowych umożliwiających pomiary taśm HTS w jednorodnym polu magnetycznym;
- Opracowanie systemu akwizycji danych przy pomiarach prądów krytycznych, bazującego na technologii OCR;
- Dokonanie charakteryzacji kątowej wybranych taśm HTS oraz wyodrębnienie modeli gęstości prądów krytycznych z użyciem MBP;

Przedstawione cele zrealizowano jako kolejne etapy pracy, a opisane wyniki badań i dyskusję uzyskanych rezultatów opisano w kolejnych rozdziałach niniejszej pracy.

1.3. Zakres i metodyka badań

W ramach prac badawczych przyjęto standardową metodykę naukową. Bazującą na analizie literatury, w zakresie badania taśm HTS i ich charakteryzacji kątowej oraz wykorzystując ogólnodostępną bazę danych przeprowadzono analizę porównawczą wybranych taśm pod względem zależności kątowej prądów krytycznych I_c . Wyniki pomiarów odniesiono do modeli opisujących zjawisko oraz zaproponowano własne rozszerzenia modeli bazujących przekształceniach modelu Kima z uwzględnieniem funkcji hiperbolicznych. W ramach opracowania opisano krótko metody numeryczne wykorzystywane w analizie taśm HTS oraz przedstawiono wyniki autorskiej metody bezparametrycznej (MBP) służącej do ekstrakcji modeli gęstości prądu z pomiarów prądów transportu. Ostatnia część badań związana była z realizacją pomiarów, na opracowanych konstrukcjach stanowisk testujących wraz z systemem pomiarowym przeprowadzono charakteryzację taśm HTS w warunkach obecności zewnętrznego pola magnetycznego.

Wykonanie eksperymentów w szczególności z wykorzystaniem stanowisk pomiarowych miało za zadanie potwierdzenie koncepcji badawczej oraz ogólnego założenia pracy, a otrzymane wyniki stanowiły podstawę do analizy porównawczej z innymi wynikami zaczerpniętymi z literatury.

W ramach prac badawczych zdefiniowano podstawowe założenia początkowe, mające na celu zawężenie obszaru badawczego. Założenia przedstawiały się następująco:

1. Wykorzystanie taśm BiSCCO (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide) i YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) do analizy. W analizie laboratoryjnej wykorzystano dostępne taśmy 1G BiSCCO, oraz 2G odpowiednio produkcji AMSC, SuperOx i SuperPower.
2. Analiza taśm HTS 2G w oparciu o badania prądów krytycznych przeprowadzonych w temperaturze 77,5 K dla pola własnego oraz zewnętrznego pola $B = 0,2$ T; $0,3$ T; $0,5$ T oraz 1 T, które uwzględniają wpływ słabych pól magnetycznych na wartość prądów krytycznych.
3. Wykorzystanie magnesów trwałych NdFeB (Neodymium Iron Boron) N45 jak źródła pola magnetycznego.
4. Wykorzystanie konfiguracji macierzy Halbacha celem zwiększenia wartości pola magnetycznego w obszarze badanym oraz zapewnienia jednorodnego rozkładu pola magnetycznego w układzie cylindrycznym.
5. Przeprowadzenie analizy w polu jednorodnym celem porównania wyników badań z systemami wykorzystującymi magnesnicę.
6. Wykorzystanie półautomatycznego systemu akwizycji danych do wyznaczania I_c z wykorzystaniem systemu OCR (Optical Character Recognition).
7. Zastosowanie wymuszenia DC i metody czterozaciskowej pomiaru spadku napięcia.
8. Pominięcie wpływu temperatury, ze względu na wykorzystanie ciekłego azotu przy ciśnieniu atmosferycznym 77 K.

1.4. Struktura pracy

Niniejsza praca składa się z siedmiu rozdziałów, w tym wprowadzenia i podsumowania. Pierwsze rozdziały zawierają teoretyczne informacje mające na celu wprowadzenie w zagadnienie nadprzewodnictwa oraz tematyki niniejszej pracy. Rozdziały 4 – 6 zawierają wyniki prac badawczych oraz eksperymentalnych prowadzonych przez autora. Poniżej przedstawiono krótki opis zawartości poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 1 jest bieżącym rozdziałem, wprowadzającym czytelnika do tematyki poruszanej w rozprawie. Przedstawiono w nim cel oraz tezę pracy, motywację oraz zakres i metodykę badań.

Rozdział 2 obejmuje objaśnienie i wprowadzenie do nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego. W rozdziale tym opisano skrótowo rys historyczny dotyczący nadprzewodnictwa, podstawowe teorie opisujące zjawisko, scharakteryzowano materiały i właściwości nadprzewodników. Rozdział został zakończony przedstawieniem zastosowań nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w ujęciu systemu elektroenergetycznego oraz transportowego.

Rozdział 3 zawiera szczegółowe informacje o taśmach nadprzewodnikowych, będących obiektem badań w niniejszej pracy. W rozdziale tym dokonano opisu metod produkcji, budowy taśm głównych producentów. Przedstawiono analizę danych pomiarowych dla wybranych zakresów zewnętrznych pól magnetycznych. Dla zestawionych danych dokonano analizy modeli prądów krytycznych oraz dopasowania parametrów modeli do wyników jako przykład problemu prostego.

Rozdział 4 zawiera opis koncepcji metody bezparametrycznej MBP wykorzystywanej do ekstrakcji modeli gęstości prądów krytycznych na podstawie charakterystyki kątowej prądów krytycznych. W metodzie tej uwzględniono wpływ prądów ekranujących na wartości prądów krytycznych w polach o niskich wartościach. Metoda MBP jest przykładem rozwiązania problemu odwrotnego, który nie wymaga adiustacji parametrów modeli.

Rozdział 5 zawiera opis koncepcji nowego stanowiska pomiarowego służącego do charakteryzacji taśm HTS w jednorodnym polu magnetycznym. Przedstawiona koncepcja zakłada zastosowanie cylindrycznego układu Halbacha do generowania jednorodnego pola magnetycznego na powierzchni taśm HTS. Przedstawiono badania PoC (*Proof of Concept*), mające na celu potwierdzenie zasadności przyjętej koncepcji oraz doprowadzenie do zrealizowania pełnej charakteryzacji taśm, które przeprowadzono na dwóch próbkach taśm.

Rozdział 6 zawiera wyniki badań związanych z charakteryzacją wybranych taśm HTS. W rozdziale tym wprowadzono korekty do stanowiska pomiarowego, dokonano porównania taśm produkcji SuperPower o różnych właściwościach. Zaprezentowano wyniki pomiarów, przeprowadzono analizę niepewności oraz wykorzystano metodę MBP do odtworzenia zależności gęstości prądu w taśmie.

Rozdział 7 w którym zawarto podsumowanie wyników badań, wnioski oraz nakreślono kierunki dalszych badań związanych z tematyką niniejszej pracy.

2

Podstawy nadprzewodnictwa

W rozdziale zawarto podstawowe informacje dotyczące nadprzewodnictwa, celem przybliżenia tematyki, opisanie podstawowych właściwości materiałów oraz związanych z nimi zależności. Rozpoczęto od przedstawienia rysu historycznego związanego z odkryciem nadprzewodnictwa, mającego na celu określenie ram czasowych, od których datuje się badania nad zjawiskiem nadprzewodnictwa (Rozdział 2.1). W kolejnej części przybliżono wybrane prace teoretyczne, które opisują mechanizmy zjawiska (Rozdział 2.2). Opisano trzy najbardziej znane teorie: Londonów (Rozdział 2.2.1), Ginzburga-Landau (Rozdział 2.2.2) oraz teorię BSC (Rozdział 2.2.3).

W rozdziale opisano główny podział nadprzewodników na I-typu i II-typu (Rozdział 2.3) oraz scharakteryzowano podstawowe materiały wykazujące cechy nadprzewodnictwa (Rozdział 2.4).

Przedstawiono wybrane, modele i parametry teoretyczne takie jak parametry krytyczne nadprzewodników (Rozdział 2.5), model stanu krytycznego (Rozdział 2.6.1) oraz prawo potęgowe E-J (Rozdział 2.6.2).

Ostatnia część obejmuje przedstawienie zastosowań technologii nadprzewodnikowej w aplikacjach elektroenergetycznych i transportowych (Rozdział 2.7). Wybrano aplikacje, które zdaniem autora są najbardziej obiecujące w zakresie zastosowań przemysłowych oraz ich wpływu na transformację energetyczną. Opisano kable nadprzewodnikowe (Rozdział 2.7.1), silniki i generatory (Rozdział 2.7.2) oraz nadprzewodnikowe ograniczniki prądu (Rozdział 2.7.4).

2.1. Historia nadprzewodnictwa

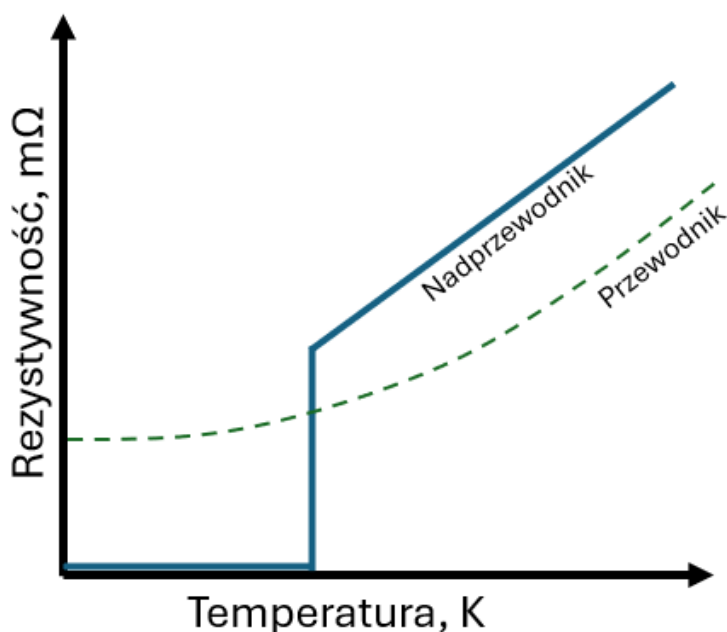
Historia nadprzewodnictwa sięga ponad stu lat. Zapoczątkowało ją odkrycie, którego dokonał Heike Kamerlingh Onnes, profesor fizyki eksperymentalnej na Uniwersytecie w Lejdzie w 1911 roku. Podczas badań nad przewodnictwem par rtęci (Hg) zaobserwował gwałtowny zanik rezystywności ρ rtęci w trakcie schładzania metalu poniżej temperatury 4 K [28].

Do badań wykorzystano wówczas specjalną technikę chłodzenia, opracowaną uprzednio przez Onnesa w 1908 roku, która pozwalała na osiągnięcie niskich temperatur, bliskich zera bezwzględnego. Badania przeprowadzono dla trzech różnych materiałów: rtęci (Hg), cyny (Sn) i ołowiu (Pb). Dla każdego z nich zaobserwowana charakterystyczną temperaturę przejścia, po której dany metal całkowicie tracił rezystywność ρ .

Na podstawie badań oszacowano, że rezystywność ρ w stanie nadprzewodnictwa spada do poziomu $\rho \leq 10^{-26} \Omega\text{m}$ [29]. W odróżnieniu do tradycyjnych metali, których rezystywność maleje wraz z zmniejszeniem temperatury T , charakteryzujących się ciągłością tego spadku, materiały nadprzewodzące wykazują gwałtowne przejście między stanami.

Na Rys. 2.1 przedstawiono podstawową zależność rezystywności od temperatury oraz różnicę między tradycyjnymi przewodnikami i nadprzewodnikami.

Dla przewodnika rezystywność rośnie wraz z wzrostem temperatury, co jest typowym zachowaniem dla tego rodzaju materiałów (zależność tą schematycznie oznaczono kolorem zielonym). Z kolei dla nadprzewodnika pozostaje stała (prawdopodobnie bliska zeru) do pewnej krytycznej temperatury, po której następuje gwałtowny wzrost a następnie liniowe narastanie. Na Rys. 2.1 zaznaczono gwałtowne przejście z określonej wartości rezystywności do wartości bliskiej zeru, reprezentuje to krytyczną temperaturę, poniżej której materiał staje się nadprzewodnikiem.



Rysunek 2.1. Charakterystyka rezystywności w funkcji temperatury pokazująca zanik rezystywności w nadprzewodniku (niebieski kolor) w porównaniu z metalami, które nie są nadprzewodnikami, takimi jak miedź (zielony kolor).

Samo odkrycie właściwości idealnego przewodnictwa w nadprzewodnikach oraz uzyskanie przez jej autora w 1913 roku Nagrody Nobla z dziedziny fizyki zapoczątkowało trwający ponad sto lat okres badań materiałów nadprzewodnikowych.

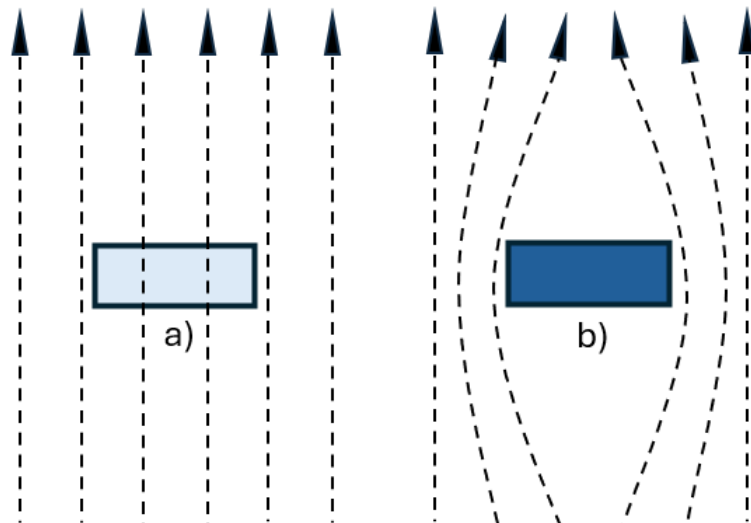
Materiały nadprzewodnikowe nie tylko charakteryzują się doskonałym przewodnictwem w temperaturze poniżej temperatury krytycznej T_c ale także specyficznymi właściwościami magnetycznymi.

Zaobserwowanie dodatkowych własności nadprzewodników stanowiło kolejne odkrycie, które tym razem dotyczyło wypierania pola magnetycznego z całej objętości nadprzewodników [30].

Odkrycie dokonane przez dwóch niemieckich naukowców Walthera Meissnera oraz Roberta Oschsenfelda w 1931 roku potwierdziło, że nadprzewodnik umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym H mniejszym od pola H_c wypycha z całej swojej objętości pole magnetyczne na zewnątrz struktury stając się idealnym diamagnetykiem.

W literaturze opis tego zjawiska, nazywany jest efektem Meissnera, charakteryzuje się występowaniem prądów ekranujących na powierzchni materiału nadprzewodnikowego. Prądy ekranujące generują pole elektromagnetyczne o zwrocie przeciwnym do zewnętrznego pola elektromagnetycznego o takiej samej wartości. Powoduje to powstanie idealnego diamagnetyzmu [30].

Na Rys. 2.2 zilustrowano zjawisko wypierania pola magnetycznego z całej objętości idealnego nadprzewodnika. Poniżej temperatury krytycznej linie strumienia magnetycznego przenikają cały materiał (przedstawiono na Rys. 2.2a), co jest jednoznaczne z brakiem występowania stanu nadprzewodnictwa. Poniżej temperatury krytycznej obserwuje się całkowite wypychanie pola magnetycznego z objętości nadprzewodnika (co jest widoczne na Rys. 2.2b).



Rysunek 2.2. Rozkład pola magnetycznego w idealnym nadprzewodniku znajdującym się a) powyżej temperatury krytycznej, b) poniżej temperatury krytycznej.

W początkowym okresie, kierując się odkryciem Onnesa podejmowano próby teoretycznego wytłumaczenia zjawisk fizycznych oraz poszukiwania nowych materiałów wykazujących właściwości nadprzewodzące wśród dostępnych pierwiastków.

W 1935 roku bracia Fritz i Heinz London zaprezentowali teorię, która pozwoliła zrozumieć nadprzewodnictwo na poziomie makroskopowym, wskazując na jego idealną przewodność i diamagnetyzm, a także wyjaśniając efekt Meissnera [31]. Rozwinięciem teoretycznym była

teoria Ginzburga-Landaua z 1950 roku, która wprowadziła funkcję porządku charakteryzującą stan nadprzewodnictwa [32]. Kluczowym osiągnięciem w teorii nadprzewodnictwa była teoria BCS, która wyjaśniła, jak elektrony tworzące pary Coopera przyczyniają się do zjawiska nadprzewodnictwa przez obniżenie energii całego systemu [33]. Wszystkie z wyżej wymienionych teorii zostaną przedstawione w dalszej części pracy (Rozdział 2.2).

W 1986 roku Bednorz i Müller odkryli całkowicie nowy typ nadprzewodnika, charakteryzujący się temperaturą krytyczną około 30 K, o formule chemicznej $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_{5(3y)}$ [34]. Ze względu na wyższą temperaturę krytyczną niż do tej pory znane nadprzewodniki, materiały te nazwano nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi.

Współcześnie nadprzewodniki wysokotemperaturowe to materiały ceramiczne, których charakterystyczną cechą jest istnienie na poziomie atomowym płaszczyzn tlenków miedzi. Do ich produkcji wykorzystywane są bizmut (Bi), itr (Y), gadolin (Gd) oraz inne materiały ziem rzadkich oznaczane jako RE. Materiały te są uznawane za jedne z najbardziej obiecujących rozwiązań dla urządzeń nadprzewodzących, z temperaturą krytyczną około 92 K, co umożliwia wykorzystywanie ciekłego azotu jako substancji chłodzącej.

W 2001 roku odkryto nadprzewodnictwo w MgB_2 , znanym od dawna związku zawierającym dwa tanie w pozyskaniu pierwiastki i obficie występujące na świecie [35]. Jeszcze niedawno, bo w 2008 roku, został odkryty inny typ nadprzewodnika zbudowany na bazie żelaza. Te nowe odkrycia zrewolucjonizowały dziedzinę nadprzewodnictwa, ponieważ nie tylko przekroczyły wcześniejsze ograniczenia temperatury krytycznej, ale również zaoferowały nowe możliwości wykorzystania tańszych i łatwiej dostępnych materiałów [36].

Przez ostatnie dwadzieścia lat dokonano znaczącego postępu w pracach dotyczących zastosowań nadprzewodnictwa. Opracowano szereg programów, dzięki którym zaprojektowano i wykonano demonstratory [37–39]. W kontekście zastosowań elektroenergetycznych największe znaczenie ma wykorzystanie nadprzewodników w liniach przesyłowych [40, 41], nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu i transformatorach [42–44] oraz w aplikacjach odnawialnych źródeł energii jakimi mogą być turbiny wiatrowe [45].

Należy mieć na uwadze, że nadprzewodnictwo jest obecnie popularną dziedziną nauki zarówno w kontekście opracowania materiałów o wyższych temperaturach krytycznych, opracowania teorii nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego jaki i wykorzystania obecnych nadprzewodników do wielkoskalowej produkcji urządzeń i systemów.

2.2. Wybrane teorie nadprzewodnictwa

Przez ostatnie dziesięciolecia, dyscyplina fizyki ciała stałego doświadczyła znaczącego postępu w zakresie teoretycznego rozumienia zjawiska nadprzewodnictwa. Jest to zjawisko, które ze względu na swoją wielowymiarową naturę, wymaga interdyscyplinarnego podejścia łączącego teorię elektromagnetyzmu, zasady termodynamiki oraz analizę właściwości materiałów o "zerowym" oporze elektrycznym. Różnorodność teorii, które powstały w tym obszarze, podkreśla złożoność tego fenomenu [46, 47].

W aspekcie zastosowań nadprzewodników w dziedzinie elektroenergetyki, kluczowe znaczenie ma gruntowne zrozumienie makroskopowych teorii nadprzewodnictwa. Należy podkreślić, że przedstawione niżej teorie skoncentrowane są głównie na nadprzewodnikach niskotemperaturowych, co stanowi istotne ograniczenie w kontekście poszukiwania jednolitej teorii nadprzewodników wysokotemperaturowych, która po dzień dzisiejszy nie została opublikowana. W ramach wprowadzenia w tematykę pracy przedstawiono wybrane, podstawowe teorie nadprzewodnictwa, pozwalające opisać zjawiska zachodzące

w nadprzewodnikach.

2.2.1. Teoria Londonów

Fenomenologiczną teorię opisującą właściwości elektrodynamiczne nadprzewodników opracowali Fritz i Heinz London w 1935 roku. Model dwu-cieczowy został przez nich wykorzystany do opisu zjawiska wnikania pola magnetycznego w materiałach nadprzewodnikowych.

Celem opisu tego zjawiska zaproponowano podział wszystkich elektronów przewodnictwa na dwa rodzaje: elektrony normalne, podlegające rozpraszaniu i elektrony nadprzewodnikowe, które nie ulegające rozpraszaniu. W efekcie późniejszych prac badawczych dowiedziono, iż stanowiło to znaczące ograniczenie teorii [31].

Założono, że elektrony nadprzewodnikowe mają zdolność swobodnego przemieszczania się w polu elektrycznym z przyspieszeniem wynikającym z II zasady dynamiki Newtona. Wówczas w przewodniku gęstość prądu nadprzewodzącego można wyrazić za pomocą wzoru (2.1). Gęstość prądu jest proporcjonalna do liczby nadprzewodzących elektronów oraz ich prędkości.

$$\mathbf{J} = n_s e \mathbf{v}_s \quad (2.1)$$

gdzie: n_s - liczba elektronów nadprzewodzących w jednostce objętości, e - ładunek elektryczny (1.602×10^{-19} C), \mathbf{v}_s - prędkość nadprzewodzących elektronów.

Podstawiając zależność (2.1) do zależności na przyspieszenie elektronów otrzymujemy pierwsze równanie Londonów w postaci (2.2). Równanie to wyraża, że zmiana gęstości prądu w nadprzewodniku w czasie jest proporcjonalna do natężenia pola elektrycznego oraz liczby nadprzewodzących elektronów i kwadratu ładunku elektronu, podzielonych przez masę elektronu.

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = \frac{n_s e^2}{m} \mathbf{E} \quad (2.2)$$

gdzie: m to masa elektronu ($9,109 \times 10^{-31}$ kg), e - ładunek elektryczny (1.602×10^{-19} C) \mathbf{J} - gęstość prądu wywołanego przepływem elektronów nadprzewodnikowych, \mathbf{E} - wektor natężenia pola elektrycznego.

Na podstawie zaproponowanego równania można zauważyć możliwy wzrost gęstości prądu do nieskończoności przy przyłożonym dowolnie małym polu elektrycznym. W normalnych metalach gęstość ta jest ograniczana poprzez proces rozpraszania elektronów i defekty struktury. W przypadku nadprzewodnictwa tylko przekroczenie wartości krytycznej nadprzewodnika prowadzi do utraty tej własności. Jest to uogólniona definicja gęstości prądu krytycznego J_c .

W materiale nadprzewodnikowym przepływ prądu wywołany jest ruchem elektronów nadprzewodnikowych. Aby znaleźć zależność pomiędzy przepływającym prądem a polem magnetycznym posłużono się równaniem Faradaya (2.3) i równaniem Ampera (2.4), które zostało pomniejszone o prądy przesunięcia.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Podstawiając zależność na gęstość prądu z równania (2.1) do równania Faradaya otrzymujemy zależność (2.3). Jako, że pole magnetyczne jest bezźródłowe, równanie uproszczono do postaci (2.5). W równaniu tym wprowadzony jest parametr Londona oznaczony λ (2.6).

$$\nabla \times \nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}} = \frac{9.42 \times 10^6}{\sqrt{\pi n_s}} \quad (2.6)$$

Równanie (2.5), nosi nazwę drugiego równania Londonów. Jest słuszne tylko w przypadku nadprzewodników pierwszego rodzaju. Równanie to opisuje wir prądu istniejący w nadprzewodniku wokół stałego pola magnetycznego.

Teoria Londonów opisuje zjawisko wnikania pola magnetycznego do materiałów nadprzewodnikowych. Składowa pola magnetycznego zanika wykładniczo wewnątrz nadprzewodnika, a stała wartość λ_L oznaczona jest jako głębokość wnikania pola magnetycznego (typowa wartość głębokości wnikania wynosi około 10^{-8} m) [48]. Charakteryzuje zatem odległość od brzegu nadprzewodnika na jaką pole magnetyczne wnika w materiał nadprzewodnikowy [49].

W teorii Londonów efekt Meissnera tłumaczy się z wykorzystaniem prądów ekranujących, które wzbudzone na powierzchni nadprzewodnika generują pole kompensujące wpływ pola zewnętrznego. Prądy te płyną przez nadprzewodnik tylko w warstwie powierzchniowej i wnikają do jego wnętrza zgodnie z określoną głębokością wnikania. Istnieje zatem maksymalna gęstość prądu oznaczana jako J_c - krytyczna gęstość, przy której wewnątrz nadprzewodnika zostaje wypychane pole równe H_c - polu krytycznemu. Analogicznie w przypadku przepływu prądu przez nadprzewodnik o wartości gęstości J_c generowane na nadprzewodniku jest pole magnetyczne H_c .

Z punktu widzenia niniejszej pracy istotny jest fakt, że w obecności zewnętrznego pola magnetycznego wartość prądu maleje do zera przy $H = H_c$.

2.2.2. Teoria Ginzburg-Landau

Odmienne podejście do opisu zjawiska nadprzewodnictwa zostało zaproponowane przez Witalija Ginzburga i Lwa Landaua [32]. Teoria oparta jest na równaniach mechaniki kwantowej i podobnie jak wyżej opisana teoria Londonów ma charakter fenomenologiczny.

Zachowanie elektronów nadprzewodnikowych opisane jest za pomocą funkcji falowej, zwanej równaniem Ginzburga Landau, która opisuje energię swobodną w okolicach przejść fazowych.

Energię swobodną opisującą zjawisko nadprzewodnictwa opisuje równanie (2.7). W równaniu tym można wydzielić trzy zasadnicze części reprezentujące kolejno energię kinetyczną, energię potencjalną oraz energię interakcji nadprzewodzących elektronów.

$$F = F_n = \int \left(\frac{\hbar^2}{2m^*} |\nabla \Psi|^2 + \alpha |\nabla \Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\nabla \Psi|^4 \right) dV \quad (2.7)$$

gdzie: F - całkowita energia swobodna układu nadprzewodzącego, F_n - energia w stanie normalnym, Ψ - funkcja falowa nadprzewodnika opisująca gęstość nadprzewodzących elektronów. m^* - masa spoczynkowa elektronu, \hbar - zredukowana stała Plancka, która wynosi

1.054×10^{-34} Js, α - parametr temperaturowy, β - parametr materiałowy.

W teorii tej wprowadzono parametr porządku $|\Psi|^2$, który jest utożsamiany z gęstością nośników w nadprzewodniku i jej zmiany w przestrzeni. Wyznacza się go z wykorzystaniem elektronów nadprzewodzących za pomocą równania (2.8).

$$\Psi = \Psi(\mathbf{r}) = n(\mathbf{r})^{1/2} e^{i\phi(\mathbf{r})}, \quad (2.8)$$

gdzie: \mathbf{r} - wektor położenia, $n(\mathbf{r})$ -funkcja opisującą lokalną gęstość nadprzewodników w punkcie, $e^{i\phi(\mathbf{r})}$ - reprezentuje fazę funkcji folkowej $\phi(\mathbf{r})$

Równania mechaniki kwantowej pozwalają na opis zjawiska nadprzewodnictwa. Dodatkowo możliwe jest wyznaczenie charakterystycznych parametrów nadprzewodnika. W tym celu wykorzystuje się równania Ginzburga - Landau (2.9), (2.10).

$$\alpha\Psi + \beta|\Psi|^2\Psi + \frac{1}{2m} (i\hbar\nabla - 2e\mathbf{A})^2 \Psi = 0, \quad (2.9)$$

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \frac{e}{m} [\Psi^* (-i\hbar\nabla - 2e\mathbf{A}) \Psi], \quad (2.10)$$

Pierwszym z charakterystycznych parametrów jest długość koherencji ξ , będąca długością, dla której gęstość nośników nadprzewodzących maleje do zera. Długość koherencji można wyznaczyć z teorii Ginzburga-Landau wykorzystując równanie (2.9) oraz zakładając zerowe pole magnetyczne na powierzchni nadprzewodnika. Otrzymujemy wtedy równanie (2.11):

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + \alpha\Psi + \beta|\Psi|^2\Psi = 0, \quad (2.11)$$

$$\xi^2(T) = \frac{\hbar}{2m|\alpha|}, \quad (2.12)$$

Kolejnym parametrem jest głębokość wnikania pola magnetycznego λ_{GL} , którą wyznacza się z równania (2.10). Założeniem upraszczającym, pozwalającym zaniedbać parametr porządku jest hipotetyczne umieszczenie nadprzewodnika w słabym polu magnetycznym. Wówczas można przyjąć że $n_s = 4|\Psi_0|^2$ oraz wyznaczyć głębokość wnikania z następującej zależności (2.13):

$$\lambda_{GL}^2 = \frac{m}{\mu_0 n_s e^2} = \frac{m}{\mu_0 4\pi |\Psi_0|^2 e^2}, \quad (2.13)$$

Wzajemna relacja pomiędzy powyższymi długościami jest scharakteryzowana przez parametr Ginzburga - Landau κ , na podstawie którego można dokonać podziału typu nadprzewodników. Współczynnik κ jest ilorazem głębokości wnikania oraz długości koherencji (2.14) [50].

$$\kappa = \frac{\lambda_{GL}}{\xi} = \frac{\lambda}{2} \quad (2.14)$$

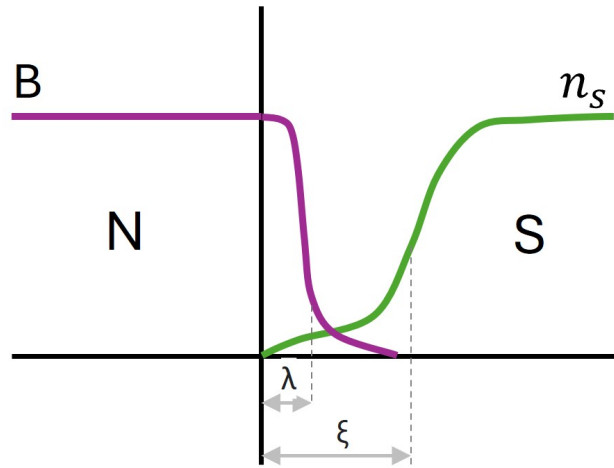
Współczynnik ten jest niezależny od temperatury, a jego wartość stanowi jedno z kryterium podziału nadprzewodników. Podstawowy podział nadprzewodników wyróżnia nadprzewodniki I-typu, dla których obowiązuje zależność (2.15).

$$\kappa < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.15)$$

oraz nadprzewodniki II-typu, które cechują się współczynnikiem κ określonym zależnością (2.16).

$$\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.16)$$

Podsumowując, teoria Ginzburga - Landaua pozwala opisać wpływ pola magnetycznego na gęstość nośników nadprzewodnikowych, wykorzystując do tego celu parametry takie, jak głębokość wnikania oraz długość koherencji. Co istotne, teoria ta nie uwzględnia możliwości związania się ze sobą dwóch elektronów w parę Coopera, zjawisko to zostanie opisane w kolejnej teorii. Graficzną reprezentację głębokości wnikania czy długości koherencji przedstawiono na Rys. 2.3.



Rysunek 2.3. Graficzna reprezentacja głębokości wnikania i długości koherencji (N - stan normalny, S - stan nadprzewodnikowy, B - indukcja magnetyczna n_s - gęstość par Coopera).

2.2.3. Teoria BSC

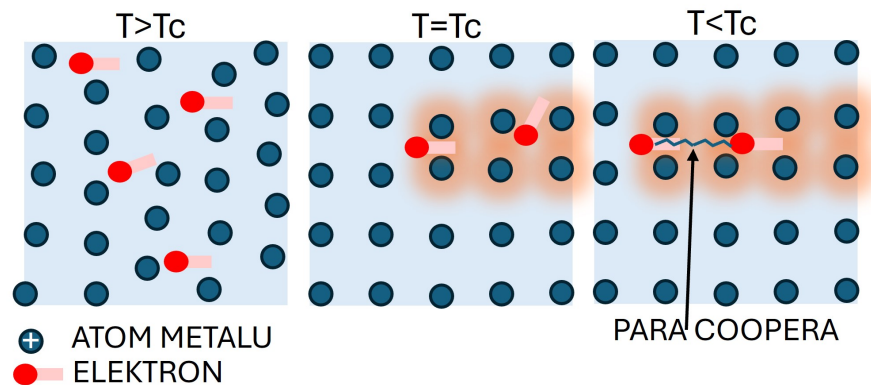
Teoria BCS, zaproponowana przez J. Bardeena, L. Coopera i J.R. Schrieffera w 1957 roku, opisuje mikroskopowy mechanizm powstawania par Coopera [51]. Autorzy w opracowaniu wykazali, że w niskich temperaturach ruch elektronu w sieci krystalicznej wpływa na położenie jonów, generując siły, które indukują wiązanie między dwoma elektronami o przeciwnych spinach. Tak utworzone pary Coopera są podstawowym elementem stanu nadprzewodzącego. Prace były rozwinięciem teorii opisanej przez H. Froelicha w 1950 roku [52].

W teorii BSC wykazano, że przy odpowiednio niskiej temperaturze elektrony poruszające się w sieci krystalicznej modyfikują nieznacznie położenie jonów w sieci, które to wpływa na położenie innych jonów w kryształach.

Dwa elektrony są w stanie związać się w parę w obecności innych elektronów, tworząc uporządkowaną sieć krystaliczną - pary Coopera. W sieci tej elektrony nie ulegają rozproszeniu, co w efekcie prowadzi do zaniku oporu. W nadprzewodnikach wiązanie się elektronów w pary Coopera powoduje wytworzenie przerwy energetycznej 2Δ w widmie wzbudzeń elektronowych,

która oddziela stan podstawowy od stanu wzbudzonego.

Zgodnie z teorią BSC do wzbudzenia elektronów potrzebna jest energia równa szerokości przerwy energetycznej. Wzrost temperatury powoduje, że więcej par elektronów ulega rozerwaniu wraz ze zmniejszeniem szerokości przerwy, która w temperaturze krytycznej T_c maleje do zera. Wówczas wszystkie pary elektronów zostają rozerwane. Dzięki teorii BSC został wyjaśniony zanik oporu elektrycznego w materiałach będących w stanie nadprzewodzącym. Na Rys. 2.4 przedstawiono proces tworzenia się Par Coopera dla różnych wartości temperatur. Widoczne jest, że połączenie między elektronami powstaje przy temperaturze mniejszej od T_c .



Rysunek 2.4. Proces powstawania par Coopera przy schładzaniu nadprzewodnika.

Przedstawiona teoria jest podstawą do zrozumienia zjawiska nadprzewodnictwa w nadprzewodnikach konwencjonalnych natomiast w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych poszukuje się innych źródeł oddziaływań niż elektron - fonon wpływających na parowanie elektronów. Wśród nich wyróżnia się badania określające oddziaływania magnetyczne [53].

Należy nadmienić iż w kontekście teorii nadprzewodników wysokotemperaturowych w dalszym ciągu prowadzone są prace badawcze mające jednoznacznie opisać zjawisko. Ich odkrycie stanowiłoby ogromny przełom w badaniach.

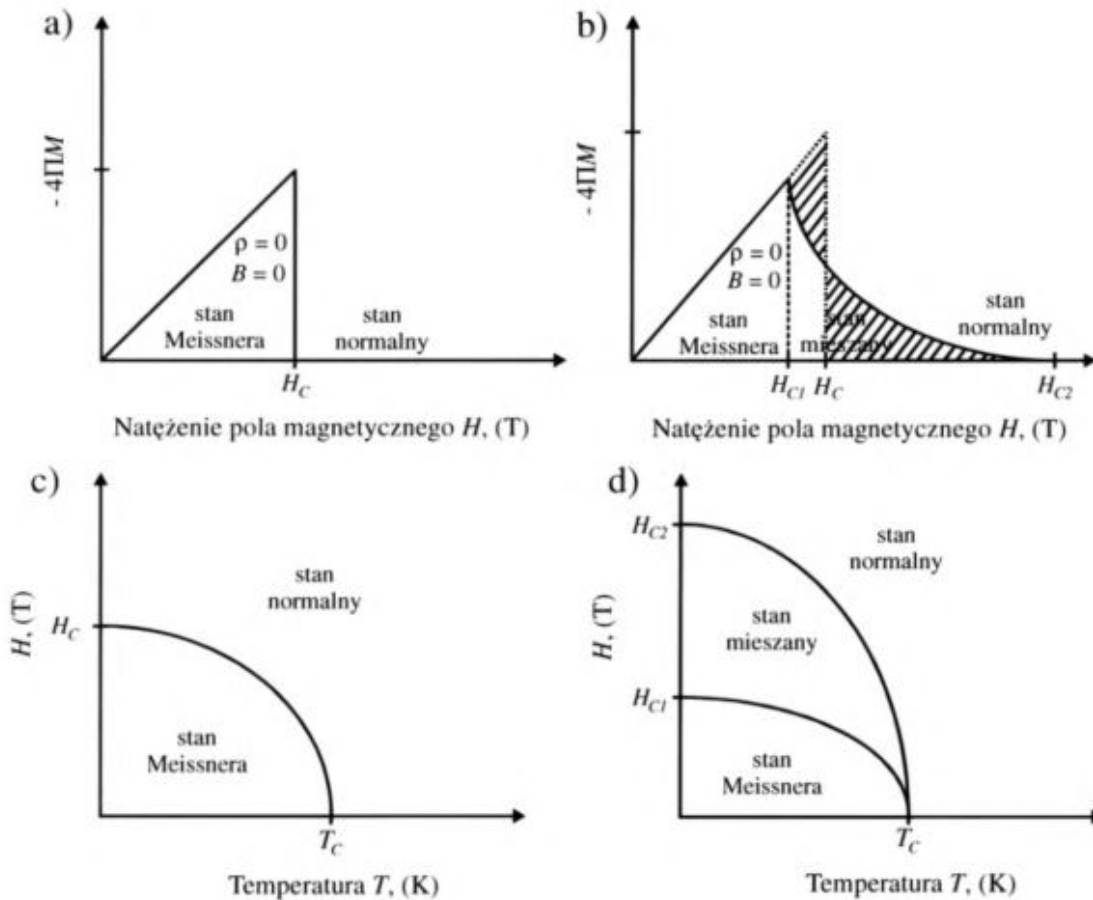
2.3. Podział nadprzewodników na I-typu i II-typu

Wprowadzenie podziału nadprzewodników związane jest z występowaniem stanu mieszanego w materiałach, które po raz pierwszy zostało opisane w 1957 przez A. Abrikosova. W swojej pracy wykazał, że nieregularne właściwości nadprzewodników nie są związane z zanieczyszczeniami w materiałach lecz, jak później zostało potwierdzone, są związane w nową grupą nadprzewodników określoną jako II-typu [54].

Nadprzewodniki I-typu charakteryzują się idealnym diamagnetyzmem występującym poniżej H_c . Po przekroczeniu wartości H_c w materiałach I- typu następuje gwałtowne przejście do stanu normalnego, w którym pole magnetyczne całkowicie penetruje materiał. Powyższe oznacza istnienie granicy energetycznej pomiędzy regionami nadprzewodzącym, a normalnym. Granica ta została przedstawiona na Rys. 2.5c. Zależność pola krytycznego H_c w funkcji temperatury można wyznaczyć z wzoru (2.22). Do nadprzewodników pierwszego typu zaliczają się w głównej mierze pojedyncze pierwiastki, które cechują się stosunkowo niskimi wartościami pól krytycznych. Dane podano w Tabeli 2.2 na str.37.

Przykładowo dla aluminium (Al) natężenie pola krytycznego wynosi: $H_c = 7,88 \cdot 10^3$ A/m, dla ołowiu (Pb) $H_c = 63,9 \cdot 10^3$ A/m, dla cyny (Sn) $H_c = 24,3 \cdot 10^3$ A/m [55].

Analizując namagnesowanie próbki nadprzewodnika I-typu w zewnętrznym polu magnetycznym można zauważyć, że do momentu, gdy $H < H_c$ namagnesowanie próbki równe jest przyłożonemu polu magnetycznemu $M = H$. Przekroczenie wartości krytycznej powoduje zanik namagnesowania i przejście w stan normalny. Zaprezentowane na Rys. 2.5a oraz 2.5c charakterystyki przedstawiają wyżej opisane zależności. W nadprzewodnikach I- typu w wyniku przyłożonego pola magnetycznego H pojawiają się prądy ekranujące I_e , które rozkładają się tak, aby indukcja magnetyczna B wewnątrz nadprzewodnika wynosiła zero.



Rysunek 2.5. Krzywa namagnesowania nadprzewodników a) I-typu, b) II-typu oraz wykres fazowe nadprzewodników c) I typu, b) II-typu. [56].

W efekcie obserwowane jest stopniowe zanikanie indukcji wewnątrz nadprzewodnika na głębokości odpowiadającej głębokości wnikania. Co istotne, prądy płynące w nadprzewodniku mogą pochodzić z dwóch źródeł: ze źródła prądu zewnętrznego w postaci prądu transportu I_t lub jako prądy ekranujące I_e pochodzące od zewnętrznego pola magnetycznego. Fakt ten istotnie wpływa na gęstość prądu krytycznego J_c w taśmach HTS.

Drugą grupę nadprzewodników stanowią nadprzewodniki II-typu, w których występuje wspomniany wcześniej stan mieszany. W nadprzewodnikach tych można wyróżnić dwie wartości krytycznego pola magnetycznego (dolne i górne) H_{c1} oraz H_{c2} są oznaczone na Rys. 2.5d.

Poniżej dolnego pola krytycznego nadprzewodnik zachowuje się identycznie jak

nadprzewodnik I-typu - następuje wypychanie strumienia magnetycznego z całej objętości. Jeżeli wartość natężenia pola magnetycznego mieści się w przedziale $H_{c1} < H < H_{c2}$ wówczas mamy do czynienia ze stanem mieszanym, w którym to występują prądy ekranujące oraz dodatkowo następuje wnikanie strumienia magnetycznego wewnątrz próbki w postaci wirów zwanych wortexami bądź fluksoidami, równoległe do kierunku wektora przyłożonego pola magnetycznego. Wiry w materiale tworzą sieć równoległych kanałów normalnych o strukturze heksagonalnej zwanej siecią Abrikosowa, w której każdy z wirów o mikroskopowych rozmiarach zawiera kwant strumienia, którego wielkość można wyznaczyć ze wzoru (2.17). Wiry zwykle układają się w charakterystyczne wzory geometryczne, które można zaobserwować z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii tunelowej [57].

$$\phi = \frac{h}{2e} = 2.0678 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (2.17)$$

Istnienie nadprzewodników drugiego rodzaju wynika z deformacji w sieci krystalicznej. Idealne nadprzewodniki drugiego rodzaju nie są zdolne do przenoszenia prądu nadprzewodzącego, co wynika z siły Lorenza (ruchu sieci wirów w materiale). Maksymalny prąd krytyczny zostaje zdefiniowany w momencie gdy wszystkie wiry zostają zakotwiczone, co uniemożliwia ich przesuwanie. Wówczas wartość prądu krytycznego można określić z zależności (2.18).

$$\mathbf{F}_{\text{pinning}} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2.18)$$

Graficzną reprezentację wirów przedstawiono poniżej na Rys. 2.6.

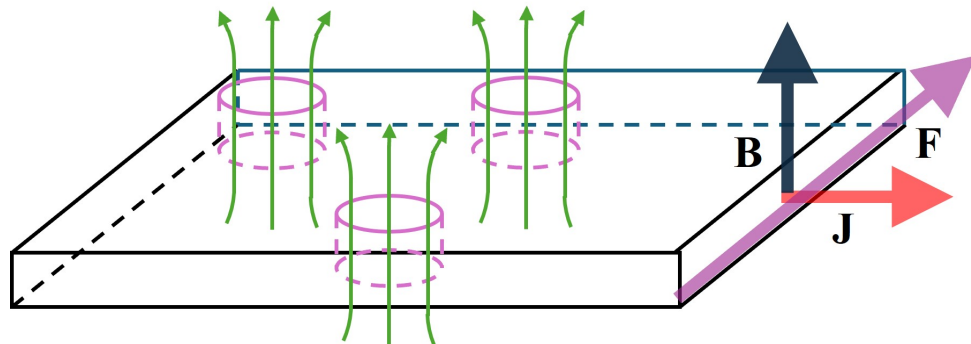


fig:wiry

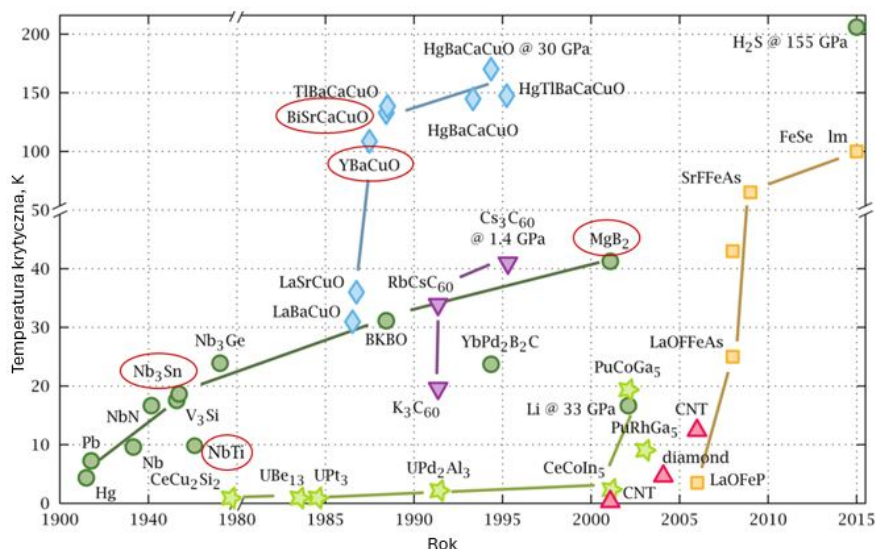
Rysunek 2.6. Graficzna reprezentacja wirów w materiale nadprzewodzącym wraz z przedstawieniem wektorów siły pinningu \mathbf{F} , gęstości prądu \mathbf{J} oraz indukcji \mathbf{B} .

Nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi o najszerszym zastosowaniu produkcyjnym są YBCO oraz BiSCCO. Są one zaliczane do materiałów II-Typu. YBCO, którego graniczna wartość pola krytycznego górnego wynosi $H_{c2} = 95 \cdot 10^6$ A/m. Bi2223, którego graniczna wartość pola krytycznego górnego wynosi $H_{c2} = 100 \cdot 10^6$ A/m.

2.4. Materiały nadprzewodnikowe

W trakcie ponad stuletnich badań nad materiałami nadprzewodnikowymi zaobserwowano właściwości nadprzewodnictwa w dużej liczbie pierwiastków, związków metalicznych i domieszkowanych półprzewodników. Występowanie nadprzewodnictwa w pierwiastkach jest dość powszechne. Występuje ono między innymi w takich pierwiastkach jak niob, wanad, cynk, ołów. W niektórych przypadkach właściwości te występują pod odpowiednim ciśnieniem czego przykładem mogą być lit, selen, cez, jod. Niemniej, najlepszymi właściwościami cechują się związki chemiczne, których odkryto blisko tysiąc. Na Rys. 2.7 przedstawiono na osi czasu daty odkryć nadprzewodnictwa w poszczególnych pierwiastkach i związkach chemicznych, które są najczęściej wykorzystywane.

Kolorem czerwonym zostały wyróżnione związki, które są wykorzystywane w nadprzewodnikowych przewodach nawojowych i które w głównej mierze stanowią podstawę do konstruowania urządzeń nadprzewodnikowych. Dla każdego z wyżej wymienionych materiałów przedstawiono informację o temperaturze krytycznej T_c . Ze względu na wartość temperatury dokonuje się podziału materiałów nadprzewodnikowych na klasyczne - niskotemperaturowe LTS (Nb_3Sn , $NbTi$) oraz wysokotemperaturowe HTS (YBCO, BiSCCO).



Rysunek 2.7. Daty odkrycia związków cechujących się właściwościami nadprzewodnikowymi wraz z temperaturami krytycznymi.[58, 59].

2.4.1. Materiały niskotemperaturowe LTS

Do materiałów niskotemperaturowych zaliczają się zarówno pierwiastki jak i związki międzymetaliczne. W początkowym okresie wykorzystywania nadprzewodnikowych przewodów nawojowych używano głównie stopu niobu i tytanu $NbTi$, który cechuje się dobrymi właściwościami plastycznymi i w połączeniu z miedzią jest łatwy w procesie obrabiania. To właśnie w oparciu o przewody $NbTi$ zostały wykonane pierwsze akceleratory nadprzewodnikowe [60]. Stopy niobu i tytanu są dobrze znane, dlatego znajdują zastosowanie w szeregu aplikacji, medycznych, akceleratorach cząstek oraz reaktorach fuzyjnych. Wymagają chłodzenia ciekłym helem (LHe) i znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie indukcja magnetyczna nie przekracza 11 T.

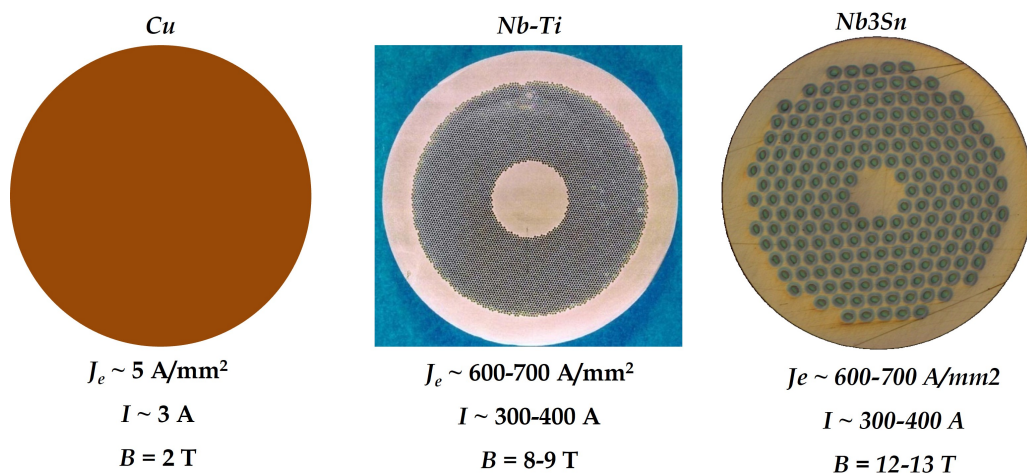
Kolejnym związkiem z którego wykonywane są przewody nawojowe, głównie w aplikacjach niskotemperaturowych LTS „Low Temperature Superconductor” jest związek niobu i cyny

Tabela 2.1. Podstawowe właściwości materiałów nadprzewodnikowych [61].

Material	Struktura kryształów	Anizotropia	Głębokość penetracji, nm	Gęstość prądu krytycznego, A cm ²	$\rho(T_c)$, $\mu\Omega$ cm
NbTi	Sześcienny o środku ciała	Znikoma	240	$4 \cdot 10^5$	60
Nb ₃ Sn	Sześcienny A15	Znikoma	65	$1 \cdot 10^6$	5
MgB ₂	Sześcienny P6/mmm	2-2,7	140	$1 \cdot 10^6$	0.4
YBCO	Ortorombowa perowskit warstwowy	7	150	$1 \cdot 10^7$	40-60
Bi2223	Tetragonalna perowskit warstwowy	50-100	150	$1 \cdot 10^6$	150-800

(Nb₃Sn). W procesie produkcji, z uwagi na właściwości materiału (kruchość), wytworzenie przewodów jest kosztowniejsze od NbTi. Na skalę przemysłową stosowane są cztery różne procesy wytwarzania Nb₃Sn tj.: „The bronze process”, „The internal-tin process”, „Modified Jelly Roll (MJR)”, oraz „Powder-in-Tube (PIT) [62]. Przewody Nb₃Sn podobnie jak NbTi są głównie wykorzystywane w aplikacjach medycznych i elektromagnesach [59, 63]. Podsumowując, Nb₃Sn pomimo bardziej skomplikowanego procesu produkcji cechuje się wyższymi wartościami pola krytycznego i pozwala na pracę do ponad 20 T.

Istotną zaletą materiałów LTS, oprócz wysokiego krytycznego pola magnetycznego, jest również izotropowa zależność gęstości prądu krytycznego od kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Ułatwia to formowanie nadprzewodzących drutów w uzwojenia bez ryzyka obniżenia gęstości prądu krytycznego z powodu kierunku pola magnetycznego, co ma miejsce w nadprzewodnikach HTS [64]. Porównanie przewodów wykonanych z NbTi oraz Nb₃Sn przedstawiono na Rys. 2.8. Widoczne zbliżone wartości prądów w przewodach NbTi oraz Nb₃Sn są blisko stokrotnie większe niż w przypadku standardowego przewodnika.



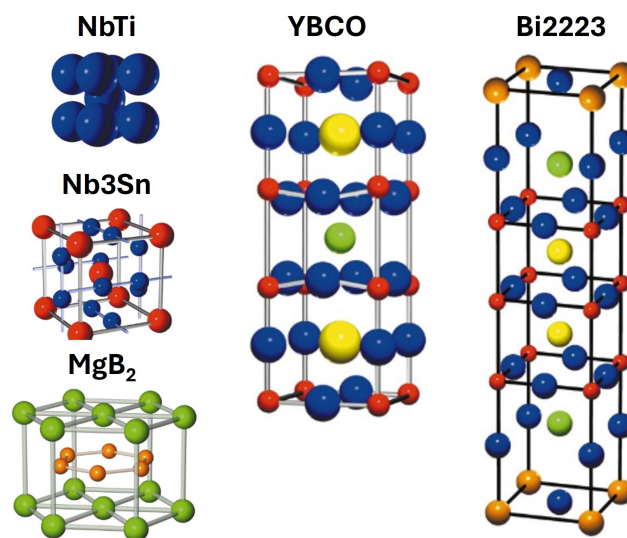
Rysunek 2.8. Porównanie parametrów przewodów NbTi oraz Nb₃Sn w odniesieniu do przewodu miedzianego [65].

2.4.2. Materiały wysokotemperaturowe HTS

W połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku odkryto nadprzewodniki wysokotemperaturowe HTS. Nie są to związki metaliczne, a materiały tlenkowe, które należą do jednej z grup związków: miedzianów lantanowych, itrowych, talowych, rtęciowych lub bizmutowych. Wszystkie te związki cechują się warstwową budową struktury krystalicznej oraz wykazują nadprzewodnictwo przy wyższych temperaturach T_c , niż temperatura wrzenia ciekłego azotu (77 K).

Cechują się bardziej złożoną strukturą krystaliczną niż LTS. Struktury najbardziej znanych materiałów Bi2223 oraz YBCO przedstawiono na Rys. 2.9. W porównaniu z strukturą materiałów niskotemperaturowych widoczna jest budowa warstwowa która jest bezpośrednią przyczyną anizotropii materiałów wysokotemperaturowych.

Struktura YBCO składa się z warstw CuO_2 (odpowiednio kolor niebieski i czerwony), pomiędzy którymi znajdują się warstwy itru (kolor żółty) i baru (kolor zielony). Atomy Cu tworzą kwadratowe płaszczyzny CuO_4 , a Ba i Y są między tymi warstwami, zapewniając stabilność struktury i umożliwiając nadprzewodnictwo poniżej temperatury krytycznej (ok. 90 K). Struktura Bi2223 składa się z warstw CuO_2 (kolor niebieski i czerwony), przedzielonych warstwami zawierającymi Bi (kolor pomarańczowy), Sr (kolor żółty) i Ca (kolor zielony). Struktura ta charakteryzuje się wyraźnie zdefiniowanymi warstwami, co ma kluczowe znaczenie dla właściwości nadprzewodnika. Zarówno YBCO, jak i Bi2223 wykazują nadprzewodnictwo w niskich temperaturach, jednak ich struktura i sposób, w jaki atomy są rozmieszczone, wpływają na ich właściwości w tym na anizotropię przewodności elektrycznej. Anizotropia Bi2223 jest tak duża, że $H^*(77\text{K})$ wynosi tylko 0,2–0,3 T, ograniczając zastosowania przy 77K wartości pól magnetycznych < 500 mT, takich jak kable energetyczne, mimo że $H_{c2}@77\text{K}$ przekracza 10 T [61]. W strukturze krystalicznej materiałów, zaprezentowanej na Rys. 2.9 można wyróżnić trzy osie krystalograficzne, zwyczajowo oznaczane a - [100], b - [010], c - [001]. W przypadku płaszczyzn P_{a-b} obserwowana jest największa przewodność elektryczną natomiast w przypadku ortogonalnej płaszczyzny P_c przewodność materiału może być nawet dziesięciokrotnie niższa, co jednoznacznie wpływa na obniżenie krytycznej gęstości prądu J_c . Dlatego też istotnym staje się uwzględnianie właściwości anizotropowych taśm HTS oraz redukcji gęstości prądu krytycznego w zależności od wartości i kierunku zewnętrznego pola magnetycznego.



Rysunek 2.9. Struktury krystaliczne $NbTi$, Nb_3Sn , MgB_2 , $Bi2223$ i $YBCO$. [61].

2.4.3. Anizotropia

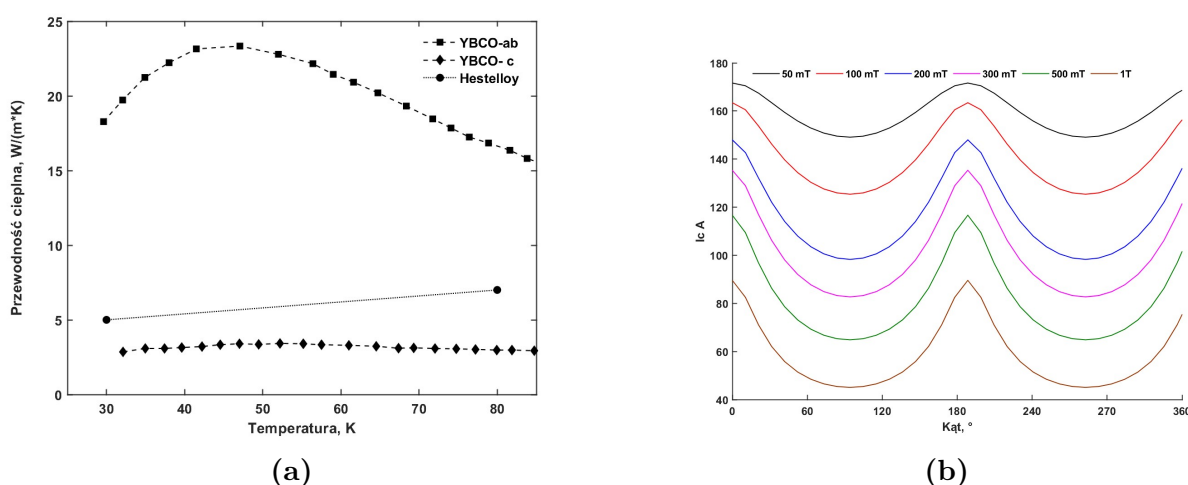
Z uwagi na fakt, iż właściwości mechaniczne i elektryczne materiałów nie są symetryczne względem wszystkich płaszczyzn nazywają się one materiałami anizotropowymi. W przypadku nadprzewodników wysokotemperaturowych największą rolę odgrywa anizotropia między płaszczyzną P_{a-b} , a osią c . Różne właściwości materiałów w poszczególnych osiach sieci krystalograficznej przedstawiono na Rys. 2.10a, gdzie zestawiono przewodności cieplne YBCO w zależności od płaszczyzny w funkcji temperatury. W celu opisanie anizotropowych właściwości materiałów wykorzystano rozwinięcie teorii GL w postaci tensora mas nośników ładunku, odpowiednio dla każdej z płaszczyzn na m_{a-b} oraz m_c [66, 67]. Ma to na celu wyznaczenie parametrów teorii GL dla różnych płaszczyzn oraz wyznaczenia parametru anizotropii określanego symbolem ϵ . Parametr ten można wyznaczyć długością koherencji lub głębokością wnikania zgodnie z (2.19).

$$\epsilon = \frac{1}{\gamma} = \frac{\lambda_{ab}}{\lambda_c} = \frac{\xi_c}{\xi_{ab}} = \sqrt{\frac{m_{ab}}{m_c}} \quad (2.19)$$

$$\epsilon_\theta^2(\theta) = \epsilon^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \quad (2.20)$$

Na tej podstawie określa się zależność kątową właściwości materiału, która odnosi się praktycznie do jednorodnego anizotropowego nadprzewodnika. Zależność ta jest podstawą do wyznaczenia modeli gęstości prądu J_c oraz modeli prądu krytycznego I_c , w których należy uwzględnić (2.20), opisana w literaturze jako zależność Blattera [68]. Na Rys. 2.10b przedstawiono zależność prądu krytycznego w funkcji orientacji linii sił pola magnetycznego oraz jego amplitudy. Widoczna jest znacząca redukcja prądów krytycznych w nadprzewodniku wraz ze wzrostem pola magnetycznego. Po uzyskaniu wartości parametrów nadprzewodnictwa dla kierunków osi krystalograficznych oraz prawa skalowania możliwe jest zapisanie anizotropowych wersji równań definiujących zachowanie zależne od pola w nadprzewodniku.

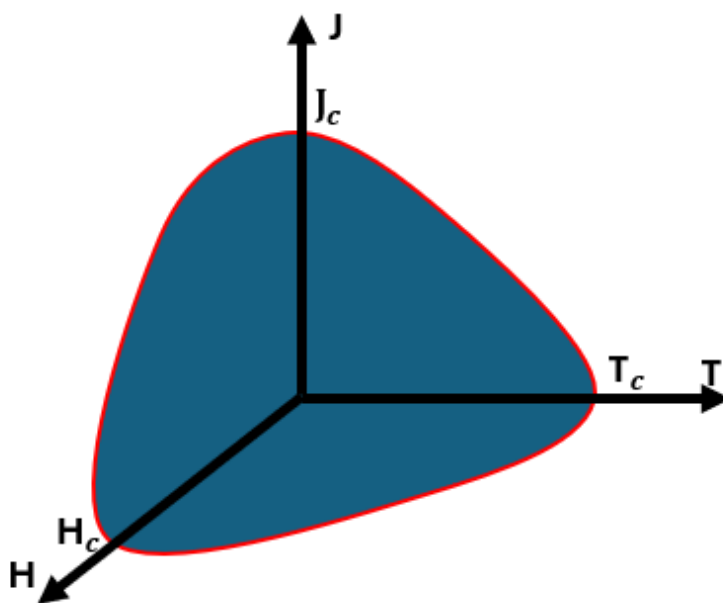
$$B_{c2}(\theta) = \frac{B_{c2}^c}{\epsilon_\theta} \quad (2.21)$$



Rysunek 2.10. (a) Przewodność cieplna w w płaszczyźnie $YBCO_{a-b}$ oraz $YBCO_c$ w funkcji temperatury (b) model zależności kątowej prądów krytycznych w materiałach HTS.

2.5. Parametry krytyczne

Podstawową cechą każdego materiału nadprzewodnikowego, określającą warunki brzegowe, po przekroczeniu których następuje wyjście z stanu nadprzewodnictwa, jest powierzchnia parametrów krytycznych. Powierzchnia krytyczna określa trzy wzajemnie ze sobą powiązane parametry krytyczne, które to determinują występowanie stanu nadprzewodnictwa w materiale [36]. Graficzną reprezentację powierzchni parametrów krytycznych przedstawiono na Rys. 2.11.



Rysunek 2.11. Graficzna reprezentacja powierzchni parametrów krytycznych: gęstości prądu J_c , natężenia pola magnetycznego H_c oraz temperatury T_c .

W celu objaśnienia podstawowych parametrów wykorzystano ich definicję zawartą w normie PN-IEC 60050-815:2002 "Międzynarodowy słownik terminologiczny elektryki Część 815: Nadprzewodnictwo oraz podstawowe wzory określające podstawowe parametry krytyczne [69].

2.5.1. Temperatura krytyczna T_c

Temperatura krytyczna, oznaczana jako T_c , definiowana jest jako wartość temperatury, poniżej której dany materiał przejawia zjawisko nadprzewodnictwa w warunkach zerowego natężenia pola magnetycznego oraz braku przepływu prądu. Jest to własność charakterystyczna dla każdego materiału nadprzewodnikowego, przy czym jej wartość jest zróżnicowana w zależności od rodzaju materiału.

W Tabeli 2.2 zaprezentowano temperatury krytyczne dla wybranych pierwiastków, które klasyfikowane są jako materiały nadprzewodnikowe I-typu [70]. Dane te podkreślają fundamentalne ograniczenie dotyczące wykorzystania tych materiałów, wynikające z ich bardzo niskich temperatur krytycznych, bliskich 0 K, oraz niskich wartości krytycznego indukcji magnetycznej, oznaczanej jako B_c .

W przypadku wymienionych materiałów temperatura krytyczna nie przekracza 10 K. Tak niskie wartości temperatury i pola magnetycznego skutecznie utrudniają zastosowanie nadprzewodników w tej formie w aplikacjach przemysłowych.

Tabela 2.2. Temperatury krytyczne T_c i krytyczna indukcja magnetyczna B_c dla nadprzewodników I-typu..

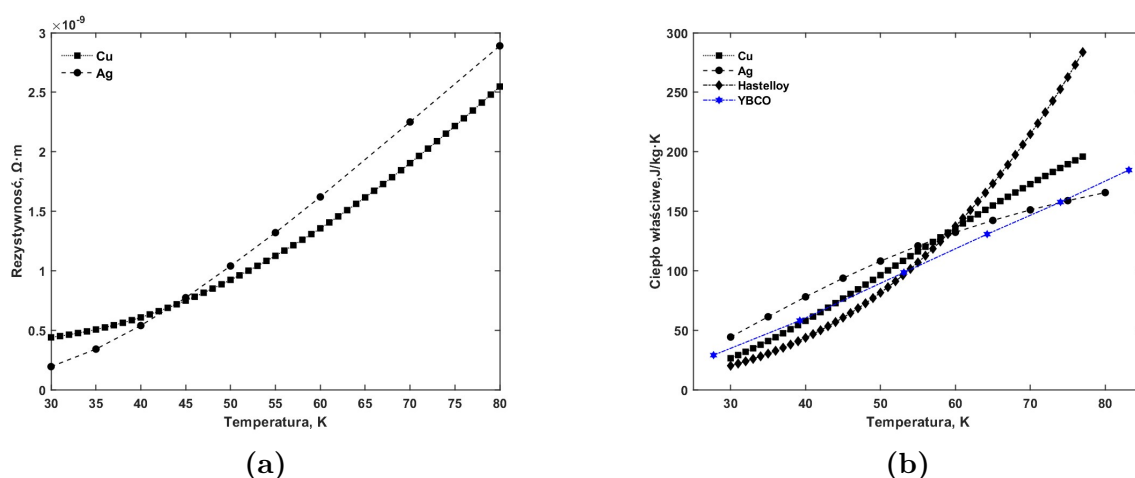
l.p.	Materiał	Symbol	T_c , K	B_c , mT
1	aluminium	Al	1,2	10,0
2	kadmi	Cd	0,5	2,8
3	cyna	Sn	3,7	31,0
4	ołów	Pb	7,2	80,0
5	rtęć	Hg	4,2	41,0

Na przestrzeni lat opracowano materiały będącymi związkami chemicznymi (opisane w rozdziale 2.4) charakteryzujące się znacznie lepszymi właściwościami niż wymienione w Tabeli 2.2, które umożliwiły wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa w aplikacjach przemysłowych. Grupę tych materiałów nazwano nadprzewodnikami II-typu. W Tabeli 2.3, zaprezentowano wybrane materiały nadprzewodnikowe II-typu [70].

Tabela 2.3. Temperatury krytyczne T_c i górna wartość krytycznej indukcji magnetycznej B_{c2} materiałów nadprzewodnikowych II-typu.

l.p.	Związek	T_c ,	B_c , T
1	NbTi	10	10 @ 4,2 K
2	Nb ₃ Sn	18	20 @ 4,2 K
3	MgB ₂	39	5,5 @ 20 K
4	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	5 @ 26 K
5	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	93	9 @ 84 K

W ujęciu technicznym, omawiane materiały nadprzewodnikowe, znajdujące obecnie zastosowanie w urządzeniach przemysłowych, wyróżniają się nie tylko wyższymi temperaturami krytycznymi, ale przede wszystkim znacząco większymi wartościami krytycznych pól magnetycznych. Warto nadmienić, iż parametry nadprzewodników ulegają zmianie wraz ze zmianą temperatury.



Rysunek 2.12. Wybrane parametry materiałowe miedzi (Cu), srebra (Ag), Hastelloy oraz YBCO w funkcji temperatury, a) rezystywność, b) ciepło właściwe.

Przykładowe dane dotyczące ciepła właściwego oraz rezystywności materiałów wykorzystywanych w produkcji nadprzewodników przedstawiono na Rys. 2.12. Porównując rezystywność srebra (Ag) oraz miedzi (Cu) widać jej wzrost wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku taśmy YBCO zależność ciepła właściwego jej funkcję liniową (wzrasta również proporcjonalnie ze wzrostem temperatury).

Temperatury krytyczne nadprzewodników powyżej 77 K, czyli temperatury wrzenia ciekłego azotu umożliwiły zastosowanie tego medium jako czynnika chłodzącego. Parametry YBCO: stosunkowo duża krytyczna indukcja magnetyczna wynosząca 9 T oraz temperatura krytyczna 84 K umożliwiła stosowanie jej materiału do budowy magnesów HTS.

2.5.2. Krytyczne natężenie pola magnetycznego H_c

Krytyczne natężenie pola magnetycznego H_c zgodnie z definicją jest to takie natężenie pola magnetycznego, które odpowiada energii kondensacji przy zerowym natężeniu pola magnetycznego. W praktyce przekroczenie tego pola powoduje utratę właściwości nadprzewodzących materiału. Zależność ta jest prawidłowa tylko dla nadprzewodników I-typu co zostało potwierdzone teoretycznie w publikacji z w 1957 roku autorstwa A. Abrikosov [71]. W pracy tej wykazał, że nieregularne właściwości są nieodłącznymi cechami nadprzewodników, będących związkami metalicznymi, zwanymi w dalszej części pracy nadprzewodnikami II-typu [72]. Zgodnie z kryterium Silsbeego, nadprzewodnik traci swoją zerową rezystancję, gdy w jakimkolwiek punkcie na powierzchni całkowita siła pola magnetycznego (wynikająca z prądu transportu i przyłożonego pola magnetycznego) przekracza H_c .

W przypadku nadprzewodników II-typu nie zachodzi pełne wypieranie strumienia przy $H < H_c$. Krytyczna wartość H_c zależy od temperatury, co wyrażono zależnością (2.22).

$$H_c(T) = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.22)$$

gdzie: T – temperatura materiału, T_c – temperatura krytyczna, H_{c0} – natężenie krytyczne pola magnetycznego.

Bardzo często wykorzystywana jest zależność krytycznej indukcji magnetycznej B_c , której wartość maleje zgodnie z równaniem (2.23). Wartość krytycznej indukcji magnetycznej B_{c0} oraz krytycznego natężenia pola magnetycznego H_{c0} jest podawana dla temperatury równej 0 K i bez działania pola zewnętrznego.

$$B_c(T) = B_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.23)$$

2.5.3. Krytyczna gęstość prądu J_c

Krytyczna gęstość prądu, oznaczana jako J_c , jest definiowana jako maksymalna gęstość prądu, którą nadprzewodnik może przewodzić bez przejścia z nadprzewodzącego stanu kwantowego do stanu normalnego, charakteryzującego się niezerową rezystywnością. Wartość gęstości prądu krytycznego w nadprzewodnikach II-typu jest ściśle powiązana z ruchliwością wirów w nadprzewodniku. Im mniejsza ruchliwość, tym większa gęstość prądu krytycznego.

Modele numeryczne opisujące gęstości prądu krytycznego są funkcją indukcji magnetycznej i temperatury. Można je wyznaczyć bezpośrednio z interpolacji, bądź na

podstawie uproszczonych modeli bazując na doświadczeniach eksperymentalnych. Wpływ temperatury na gęstość prądu krytycznego wyznacza się z zależności (2.24).

$$J_c(T) = J_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.24)$$

gdzie: J_{c0} - gęstość prądu krytycznego w temperaturze zera absolutnego (0 K).

Z kolei wpływ wartości indukcji magnetycznej na wartość gęstości prądu krytycznego wyznacza się z zależności (2.24).

$$J_c(B) = \frac{J_{c0}}{1 + \frac{B}{B_{c0}}} \quad (2.25)$$

gdzie: B_{c0} - krytyczna wartość pola magnetycznego w temperaturze zera absolutnego (0 K).

W praktyce bardzo często wykorzystuje się model Kima (2.26) [27] do określenia zależności gęstości prądu krytycznego zarówno od temperatury jak i pola magnetycznego. Jego modyfikacje pozwalają analizować poszczególne komponenty pola magnetycznego; prostopadłe i równoległe. Równaniem pozwalającym uwzględnić zjawisko anizotropii materiałów jest równanie Kima (2.27) [73].

$$J_c(\mathbf{B}, T) = J_c(T) \left(1 + \frac{|\mathbf{B}|}{B_c(T)} \right)^{-1} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} J_c(\mathbf{B}, T) &= J_c(T) \left(1 + \frac{\sqrt{(k \cdot B_{\parallel})^2 + B_{\perp}^2}}{B_c(T)} \right)^{-b} \\ &= J_c(T) \left(1 + \frac{\sqrt{(k \cdot |\mathbf{B}| \cos \theta)^2 + (|\mathbf{B}| \sin \theta)^2}}{B_c(T)} \right)^{-b} \end{aligned} \quad (2.27)$$

gdzie: B_{\perp}, B_{\parallel} - składowe pola magnetycznego odpowiednio prostopadłe i równoległe do powierzchni taśmy, k - to parametr anizotropii, który opisuje zależność między składowymi pola magnetycznego, b - współczynnik tłumienia.

Równanie (2.27) stanowi podstawę analizy przeprowadzonej w pracy, zarówno w aspekcie modeli numerycznych, jak i dopasowania wyników badań. W dalszej części pracy zostanie to szczegółowo opisane, zarówno w zakresie właściwości, jak i zastosowania.

2.6. Modelowanie właściwości nadprzewodników

Do uproszczonej analizy zjawiska nadprzewodnictwa w komponentach takich, jak taśmy nadprzewodnikowych, stosuje się modelowanie właściwości za pomocą modeli uogólnionych. W ramach podrozdziału przedstawione zostaną dwa najpopularniejsze modele wykorzystywane w analizie zjawiska nadprzewodnictwa.

2.6.1. Model Stanu Krytycznego

Opracowany w 1962 roku Model Stanu Krytycznego umożliwia analizę poszczególnych stanów pracy nadprzewodnika [74, 75]. C. Bean wykazał, że zgodnie z prawem Ampera, stopniowy spadek gęstości strumienia magnetycznego w taśmie HTS powoduje powstawanie prądu pod kątem prostym do niej i odwrotnie. Zewnętrzne pole magnetyczne powoduje powstawanie prądów ekranujących wewnątrz próbki. Prądy te mogą przyjąć odpowiednio wartości $-J_c$, 0 lub J_c . Ponadto, zewnętrzne pole magnetyczne indukuje prąd w nadprzewodniku. Po przyłożeniu zewnętrznego pola magnetycznego następuje penetracja materiału, która dokonuje się od krawędzi i postępuje w kierunku środka. Po pełnej penetracji materiału rozkład prądu nie zmienia się, niemniej gęstość strumienia magnetycznego wewnątrz materiału rośnie równomiernie aż do B_{c1} , materiał próbka przechodzi do stanu normalnego. Dodatkowo rozkład gęstości prądu krytycznego zawsze zapobiega zmianom pola magnetycznego wewnątrz nadprzewodnika. Stanowi to dwa główne założenia modelu do Beana: pole elektryczne jest równoległe do gęstości prądu oraz prąd krytyczny występuje wszędzie tam, gdzie materiał jest w stanie nadprzewodzącym.

Z uwagi na tematykę niniejszej pracy model stanu krytycznego zostanie wytłumaczony w odniesieniu do płaskich nadprzewodników w polu prostopadłym, dla których efekt rozmagnesowania materiału jest znaczący. Przyjmując, że rozkład prądu w nieskończonej cienkiej warstwie ma stałą gęstość J_c [76], to w takiej strukturze o szerokości $2a$ i grubości d przewodzącej prąd transportu, strumień przenika od krawędzi w taki następujący sposób [77]. Przedstawiono tam rozkład pola magnetycznego i prądu w taśmie nadprzewodnikowej przedstawiony na Rys. 2.13. Widoczny jest rozkład gęstości prądu dla różnych wartości prądu oraz odpowiadająca tam różna głębokość penetracji nadprzewodnika.

Dla $|x| < b$

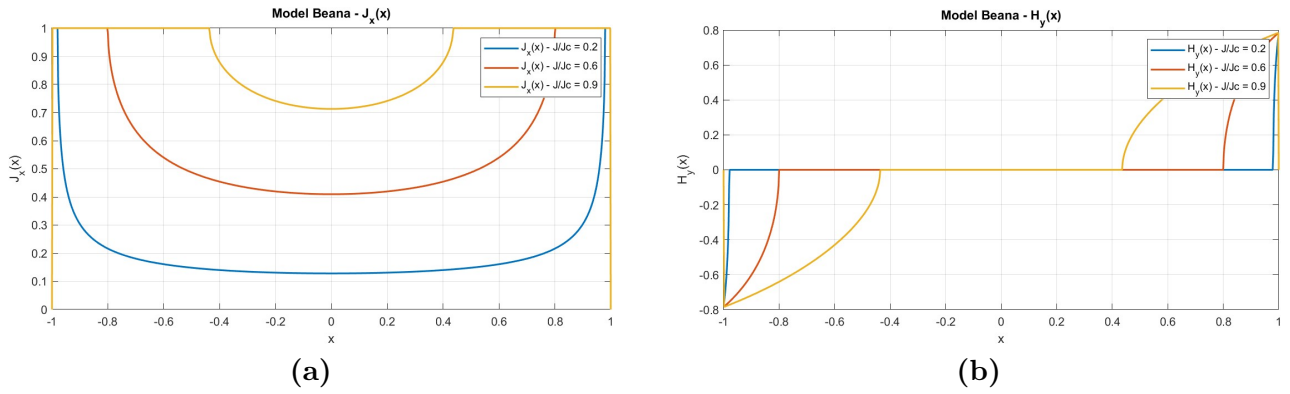
$$J_z(x) = \frac{2J_c d}{\pi} \arctan \left(\frac{a^2 - b^2}{b^2 - x^2} \right)^{1/2} \quad (2.28)$$

$$H_y(x) = 0 \quad (2.29)$$

Dla $b < |x| < a$

$$J_z(x) = J_c d \quad (2.30)$$

$$H_y(x) = \frac{H_c x}{|x|} \operatorname{arctanh} \left(\frac{a^2 - b^2}{b^2 - x^2} \right)^{1/2} \quad (2.31)$$



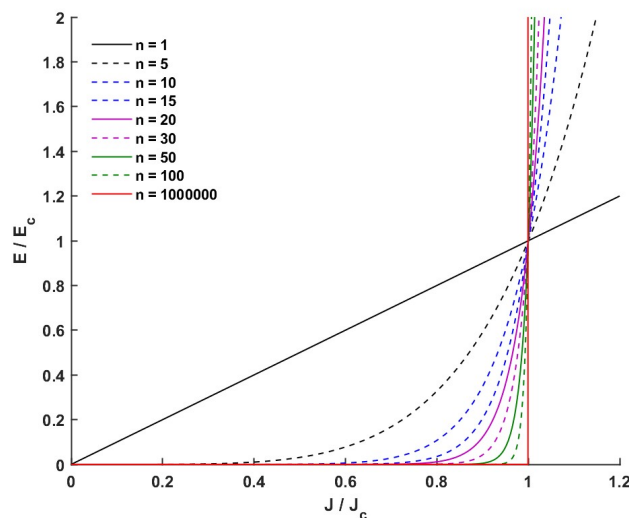
Rysunek 2.13. Rozkład a) gęstości prądu oraz b) natężenia pola magnetycznego dla taśmy HTS zgodnie z modelem Beana

2.6.2. Prawo potęgowe E-J

Prawo potęgowe jest powszechnie stosowane do modelowania nieliniowego zachowania nadprzewodników. Jest to jedno z kluczowych praw wykorzystywanych w nadprzewodnictwie. W odróżnieniu do opisanego powyżej modelu Beana prawo potęgowe uwzględnia różne inne zjawiska zachodzące w taśmach HTS, takie jak np.: pełzanie strumienia. Zapewnia interpolację pomiędzy dwoma skrajnymi przypadkami materiału $n=1$ oraz $n= \infty$. Na Rys. 2.14 zaprezentowano charakterystykę wynikającą z prawa potęgowego dla różnych wartości współczynnika n . Wyznacza się go z zależności (2.32).

$$\mathbf{E} = E_0 \left(\frac{\mathbf{J}}{J_0} \right)^n \tag{2.32}$$

Na podstawie prawa potęgowego wyznacza się wartości prądów krytycznych oraz wartość wykładnika potęgowego. Prawo potęgowe jest powszechnie używane do opisu materiałów nadprzewodnikowych wysokotemperaturowych. Jest ono zweryfikowane szerokim spektrum pomiarów prądów transportu, które empirycznie wykazały, że prawo potęgowe może dobrze opisywać szeroka gamę materiałów HTS.



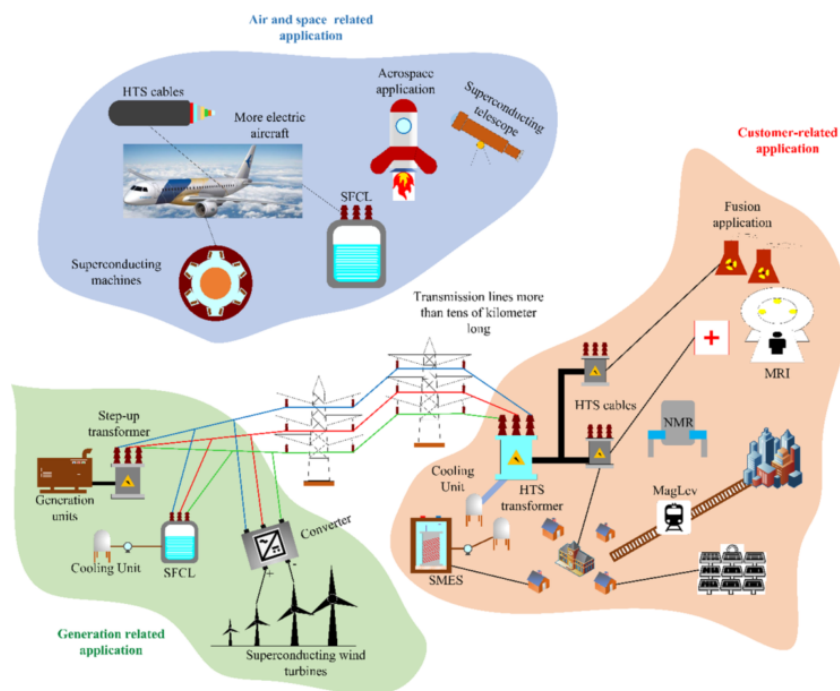
Rysunek 2.14. Charakterystyka prawa potęgowego dla różnych wartości wykładnika potęgowego.

2.7. Zastosowania nadprzewodników HTS

Potencjał technologii nadprzewodnikowych oraz korzyści płynące z jej zastosowania, jak i względnie dojrzała wielkoskalowa technologia produkcji materiałów wysokotemperaturowych sprawia, iż z roku na rok poszerzają się perspektywy zastosowań tej technologii. Przykładem tego stanu rzeczy mogą być opracowane mapy drogowe rozwoju technologii nadprzewodnikowej [78, 79], w których to opisuje się potencjał rozwoju technologii i wyznacza megatrendy.

W ramach przedstawienia zastosowań materiałów nadprzewodnikowych dokonano zawężenia obszarów zastosowań do urządzeń i aplikacji wchodzących w skład systemów elektroenergetycznych oraz transportowych. Ma to ułatwić przedstawienie technologii nadprzewodnikowej jako jednego z beneficjentów transformacji energetycznej, która stanowi kluczowy aspekt związany z rozwojem gospodarczym wielu krajów na świecie, w tym także Polski. Przedstawiając korzyści zastosowań technologii nadprzewodnikowych takie jak; bardzo duża gęstość mocy, niskie straty, należy mieć na uwadze problemy związane z wielkoskalowym zastosowaniem tej technologii, w szczególności zapewnienie chłodzenia, niezawodność jak i aspekty ekonomiczne, które w dalszym ciągu stanowią znaczące ograniczenie we wdrażaniu tej technologii.

Celem przedstawienia najbardziej obiecujących trendów, bazując na publikacji [80], dokonano podziału zastosowań na trzy obszary: aplikacje w przestrzeni powietrznej i kosmicznej, aplikacje elektroenergetyczne oraz aplikacje zorientowane na odbiorcę końcowego, w tym transportowe. To właśnie w tych obszarach przewiduje się największy rozwój technologii nadprzewodnikowej. Opis zastosowań nadprzewodnictwa odnosi się do przykładowych zrealizowanych rozwiązań, które w każdym z reprezentowanych urządzeń zostały wskazane.

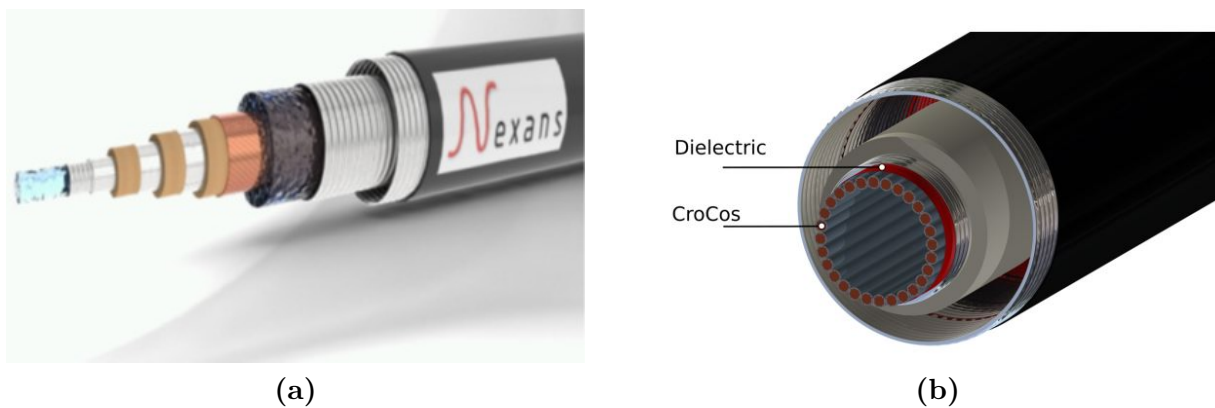


Rysunek 2.15. Ilustracja przedstawiająca rolę nadprzewodników w niedalekiej przyszłości w części systemów energetycznych, przemyśle lotniczym, fuzji jądrowej, systemach opieki zdrowotnej i programach kosmicznych [80].

2.7.1. Kable nadprzewodnikowe

Wykorzystanie taśm do produkcji kabli nadprzewodnikowych związane jest z bardzo dużymi zdolnościami przesyłowymi materiału i dużą gęstością mocy. Zastosowanie kabli HTS umożliwia ograniczenia przestrzeni technicznej w silnie zurbanizowanych terenach wielkich miast. Zasadniczo wyróżnia się dwa rodzaje kabli: z ciepłym oraz z zimnym dielektrykiem. W kablach z ciepłym dielektrykiem chłodzone są tylko nadprzewodniki, a dielektryk działa w swojej normalnej temperaturze, podczas gdy w kablach z zimnym dielektrykiem izolacja jest również wystawiona na działanie chłodziwa. Do produkcji kabli nadprzewodnikowych wykorzystuje się zarówno taśmy BiSCCO, YBCO, jak i MgB_2 .

W zależności od rodzaju, poziomów napięć oraz mocy obiektu zasilanego można wyodrębnić kable trójfazowe jednorodzeniowe, trójrdzeniowe oraz trójfazowe koncentryczne. Prowadzone są badania nad wykorzystaniem kabli CroCo wykorzystujących nadprzewodzący materiał ceramiczny, uformowany w kształcie krzyża, umieszczony wewnątrz kabla miedzianego w szczególności w aplikacjach DC [81].



Rysunek 2.16. (a) Koncentryczny kabel HTS wykorzystany w projekcie AmpaCity [82]
(b) Koncepcja kabla DC CroCos [81].

Kable nadprzewodnikowe projektowane są głównie do sieci dystrybucyjnych, czego przykładem może być projekt Ampacity w Essen w Niemczech, będący jednym z najdłuższych działających kabli HTS, operujących w sieci dystrybucyjnej, w dodatku połączony z ogranicznikiem prądu [83]. Prace aplikacyjne nad zastosowaniem kabli nadprzewodnikowych prowadzone są na całym świecie, czego przykładem mogą być projekty zestawione w Tabeli 2.4.

Z uwagi na zastosowane materiały wybrano konstrukcje oparte o taśmy BiSCCO i YBCO. Widoczna jest maksymalna długość kabli AC na poziomie 1 km, maksymalny poziom napięcia na poziomie 138 kV. W przypadku kabli DC wykorzystano kabel z maksymalnym prądem znamionowym na poziomie 20 kA i przy ograniczeniu poziomu napięcia do 1000V.

Kable nadprzewodnikowe mogą zrewolucjonizować sieci przesyłowe całej Europy i Świata, dzięki czemu praktycznie bezstratnie będzie możliwe dystrybuowanie energii pochodzącej z farm wiatrowych, w tym umieszczonych na morzu lub wykonywanie połączeń kablowych między poszczególnymi krajami.

Prace nad opracowaniem kabli o większych długościach aktualnie trwają, czego przykładem może być projekt SCARLET, (Superconducting CABLEs foR sustainabLe Energy Transition), który zakłada opracowanie i przetestowanie kabli na bazie MgB_2 , chłodzonych ciekłym helem do średnionapięciowych połączeń prądu stałego (MVDC) o mocy 1 GW (± 50 kV/10 kA) [84].

Tabela 2.4. Zestawienie oraz parametry techniczne przykładowych aplikacji kabli nadprzewodnikowych AC i DC.

Lokalizacja	Typ	Długość	Napięcie znamionowe	Prąd znamionowy	Materiał HTS
Essen, Niemcy [83]	AC	1 km	10 kV	4 kA	BiSCCO
Long Island, NY, USA [85]	AC	610 m	138 kV	2.4 kA	BiSCCO
Albany, NY, USA [86]	AC	350 m	34.5 kV	0.8 kA	BiSCCO
Jeju Island, Korea [87]	DC	500 m	80 kV	3.25 kA	YBCO
Ishikari, Japonia [88]	DC	1 km	20 kV	2.5 kA	BiSCCO
Ludwigshafen, Niemcy [89]	DC	25 m	1 kV	20 kA	YBCO

2.7.2. Silniki i generatory nadprzewodnikowe

Silniki elektryczne są jednym z głównych urządzeń odpowiadających za 40% światowej konsumpcji energii elektrycznej [90] oraz za jej wytwarzanie w generatorach. Dlatego też na przestrzeni lat opracowano wiele demonstratorów technologii nadprzewodnikowych w tym zakresie. Główne zastosowanie silników i generatorów nadprzewodnikowych to energetyka wiatrowa, napędy statków i przemysł lotniczy. Dodatkowo nadprzewodniki mogą być używane w konstrukcjach silników liniowych o wysokiej dynamice [91]. Najważniejszymi korzyściami płynącymi z zastosowania nadprzewodnictwa są wysoka sprawność, zmniejszona masa i rozmiar, uzyskany poprzez zwiększenie gęstości mocy przewodów nawojowych oraz zredukowany w stosunku do tradycyjnych konstrukcji poziom strat [92].

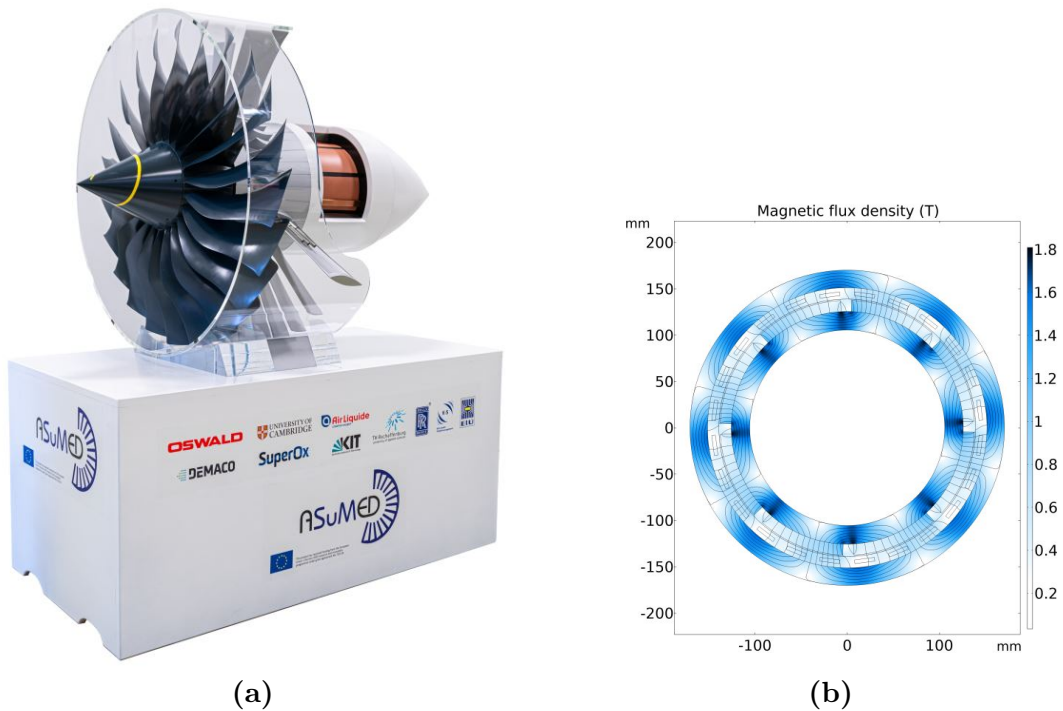
Przykładowe projekty dotyczące nadprzewodnikowych maszyn elektrycznych przedstawiono w Tabeli 2.5. W przypadku energetyki wiatrowej opracowywane są konstrukcje o mocy rzędu kilku MW. To właśnie połączenie nadprzewodnikowych turbin wiatrowych i kabli nadprzewodnikowych jest obiecującą technologią, która obecnie jest testowana.

Tabela 2.5. Zestawienie instalacji wykorzystujących kable HTS.

Przemysł	Projekt	Rok	Moc	Typ
Energetyka wiatrowa	EcoSwing [93]	2019	3.6 MW	GdBCO
Przemysł lotniczy	Airbus [94]	2021	500 kW	REBCO
Elektromobilność	Sumitomo EV [95]	2012	20-30 kW	BiSCCO
Napędy statków	36.5 MW Ship [96]	2011	36.5 MW	BiSCCO

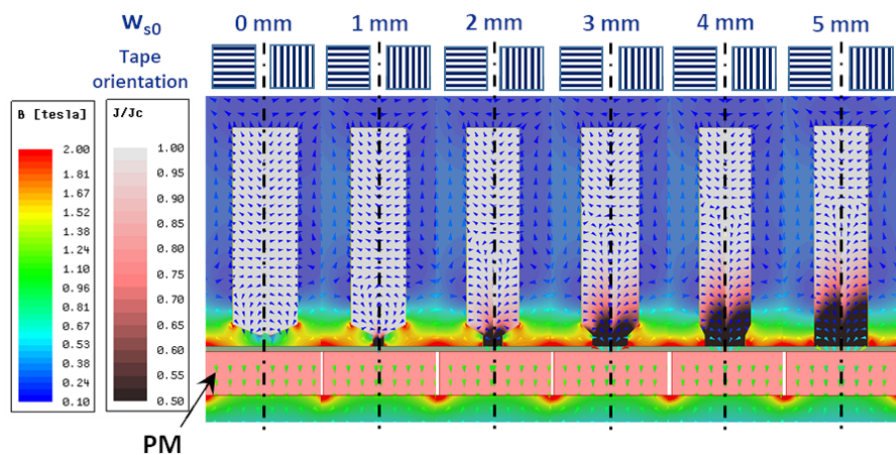
W nadprzewodnikowych maszynach wirujących w ostatnich latach dąży się do pełnego wykorzystania nadprzewodników zarówno w uzwojeniach wirników i stojanów [97]. W zakresie zastosowań materiałów zarówno taśmy nadprzewodnikowe, jak i nadprzewodniki masywne są brane pod uwagę w najnowszych konstrukcjach [98, 99]. Perspektywy wykorzystania nadprzewodników w konstrukcjach generatorów wiatrowych sprawiają, że w tym obszarze badawczym prowadzone są liczne prace konstrukcyjne oraz optymalizacja strat AC [100, 101].

Kolejnym z obszarów badań w zakresie zastosowań nadprzewodnictwa w silnikach jest przemysł lotniczy, w którym przy udziale partnerów przemysłowych opracowywane są demonstratory silników mogących znaleźć zastosowanie w nowoczesnych samolotach. Przykład takiego zastosowania przedstawiono na Rys. 2.17.



Rysunek 2.17. Silnik AsuMED wykorzystujący technologie nadprzewodnikowe (a) Makieta silnika zaprezentowana na targach Hannover Messe 2019, (b) mapa pola magnetycznego w przekroju poprzecznym. [98].

Z punktu widzenia niniejszej pracy bardzo istotnym aspektem w maszynach elektrycznych jest odpowiednie wykorzystanie taśm HTS. W tym celu prowadzone są badania symulacyjne mające na celu odpowiedni dobór materiału HTS oraz uwzględnienie jego ograniczeń, w szczególności wpływu pola zewnętrznego. Wpływ pól własnych i wzajemnych na dostępny znormalizowany prąd krytyczny w szczelinie maszyny elektrycznej przedstawiono na Rys. 2.18. Można zauważyć, że wpływ ten jest najsilniejszy w pobliżu otworów szczelin i w sąsiedztwie nasyconych obszarów rdzenia.



Rysunek 2.18. Symulacja numeryczna wpływu pola własnego i wzajemnego na znormalizowany prąd krytyczny w szczelinie maszyny elektrycznej, gdy górne (3 i 4) i dolne (1 i 2) cewki przewodzą prąd [102].

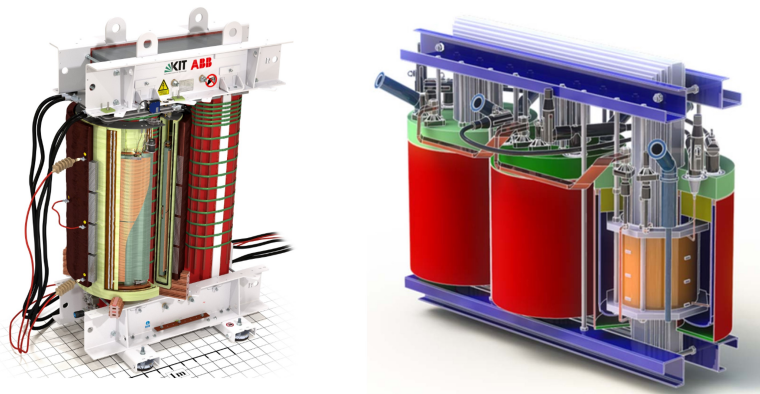
2.7.3. Transformatory

Transformatory są nieodłącznym elementem infrastruktury elektroenergetycznej i są wykorzystywane do zmiany poziomów napięć. Wśród transformatorów nadprzewodnikowych można rozróżnić konstrukcje z rdzeniem zimnym, rdzeniem ciepłym oraz bezrdzeniowe. Wykorzystanie nadprzewodników w transformatorach związane jest z założeniem ograniczenia strat, zmniejszenia rozmiarów czy zastąpienia oleju transformatorowego chłodziwem w postaci ciekłego azotu. Do tej pory opracowano liczne konstrukcje transformatorów elektroenergetycznych wykorzystujących taśmy HTS jako uzwojenia. W Tabeli 2.6 zestawiono trzy projekty w których wykorzystano przewody YBCO i BiSCCO jako uzwojenia. Ich parametry elektryczne zestawiono w Tabeli 2.6. W przypadku konstrukcji [103] uzwojenia strony dolnej wykonano w postaci kabla Roebela, co umożliwiło uzyskanie prądów na poziomie 1390A. Z kolei uzwojenia strony górnej wykonano z taśmy YBCO. Zaprojektowano je na współczynnik wykorzystania taśmy $0,25\%I_c$. Całkowite straty mocy to 936 W, z czego 390 W to straty AC strony niskonapięciowej, a 113 W straty kriogeniczne. Całkowita sprawność dla pełnego obciążenia wynosi 97 %.

Tabela 2.6. Wybrane projekty dotyczące demonstratorów transformatorów energetycznych HTS.

Kraj	Inst.	Zastosowanie	Dane	Rok	HTS
Australia [103]	Callaghan Innov.	Demonstrator	1 MVA, 11 kV/415 V	2013	YBCO
Chiny [104]	IEE CAS	Demonstrator	1.25 MVA, 10.5 kV/400 V	2014	Bi 2223
Niemcy [39]	KIT/ABB	Demonstrator	577 kVA, 20 kV/1 kV	2015	P-Cu/S-YBCO

Przewody nawojowe mogą pełnić funkcję uzwojeń transformatorów elektroenergetycznych zapewniając dużą gęstość prądu oraz mniejsze straty. Jedną z wad transformatorów HTS są wysokie koszty, które limitują aktualnie ich zastosowanie w sieciach. Koszty dużych transformatorów transmisyjnych są znacznie wyższe w porównaniu do tradycyjnych transformatorów. Dodatkowo zastosowanie przewodów HTS może znacząco zwiększyć całkowite koszty. Problemem jest także niezawodność i czas życia urządzeń

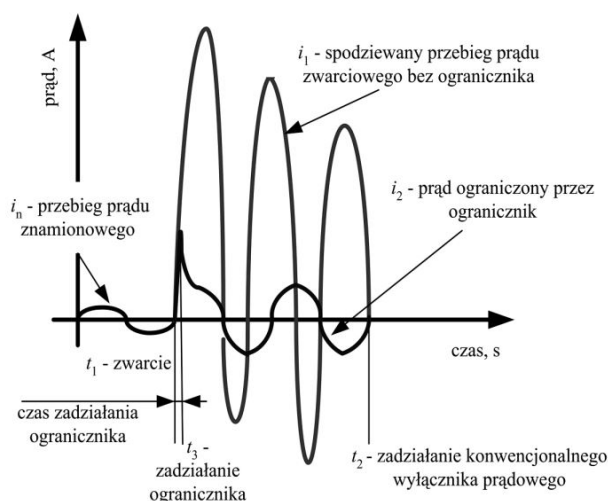


Rysunek 2.19. Konstrukcje demonstratorów transformatorów a) o mocy 577 kVA opracowany przez KIT, b) o mocy 1,25 MVA IEE CAS).

2.7.4. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu

Bezpieczeństwo pracy systemów energetycznych jest w dzisiejszym świecie rzeczą priorytetową, dlatego konieczne jest stosowanie urządzeń, mogą to bezpieczeństwo zapewnić. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu są jednym z przykładów urządzeń zabezpieczających. Cechują się pomijaniem małą impedancją w normalnych warunkach pracy. Są w stanie bardzo szybko przełączyć się do stanu wysokiej impedancji, jeśli prąd przekroczy daną wartość progową z powodu awarii. Takie urządzenie jest w stanie zwiększyć nominalną moc zwarcia sieci bez zagrożenia dla urządzenia w przypadku awarii.

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu w chwili wystąpienia zwarcia działają natychmiastowo, ograniczają wartość prądu zwarcia w momencie zaistnienia zwarcia już dla pierwszej amplitudy. Zwyczajowo czas ograniczenia jest krótszy niż $1/4$ czasu trwania okresu zwarcia. Ograniczony prąd zwarcia może być wyłączony za pomocą konwencjonalnych aparatów zabezpieczających. Na Rys. 2.20 zademonstrowano proces ograniczenia prądów zwarcia, z zaznaczeniem czasu zadziałania urządzenia.



Rysunek 2.20. Idea działania ogranicznika prądu [105].

Ograniczniki prądu dzielą się na kilka różnych typów. Wśród nich można wyróżnić dwie podstawowe konstrukcje ograniczniki rezystancyjne oraz ograniczniki indukcyjne. W ogranicznikach rezystancyjnych ograniczenie prądu następuje poprzez wzrost rezystancji nadprzewodnika włączonego szeregowo w obwód chroniony. Prąd zwarcia przekraczający wartość krytyczną powoduje przejście nadprzewodnika do stanu rezystywnego, ograniczając prąd zwarcia. W ogranicznikach indukcyjnych, w normalnych warunkach pracy, uzwojenie wtórne, wykonane z nadprzewodnika, kompensuje strumień magnetyczny pochodzący od uzwojenia pierwotnego, co daje niską impedancję ogranicznika. Podczas zwarcia, wzrost prądu w uzwojeniach powoduje przejście nadprzewodnika w stan rezystywny, zwiększając jego impedancję i ograniczając prąd [105, 106].

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu skutecznie przechodzą próby sieciowe, w których to współpracują z istniejącym systemem elektroenergetycznym spełniające swoje podstawowe funkcje. Wybrane aplikacje ograniczników obejmujące trzy projekty zrealizowane i przetestowane na terenie Unii Europejskiej zestawiono w Tabeli 2.7.

Można zatem stwierdzić, że nadprzewodnikowe ograniczniki prądu są jednym z elementów sieci przyszłości z uwagi na korzyści jakie niesie ich zastosowanie [107]:

- Zwiększenie poziomu integracji sieci, co umożliwi elastyczne połączenie między producentami, operatorami dystrybucji i konsumentami;
- Ułatwienie przyłączenia rozproszonej generacji - SFCL sprzyjają przyłączeniu rozproszonej generacji, w tym także ze źródeł nieprzewidywalnych, takich jak odnawialne źródła energii;
- Poprawa jakości napięcia - pozwalają na poprawę jakości energii, redukując przerwy, spadki napięcia, zniekształcenia harmoniczne i migotania napięcia.

Tabela 2.7. Zestawienie instalacji wykorzystujących nadprzewodnikowe ograniczniki prądu.

Rok	Kraj	Typ	Wiodąca firma	Napięcie	Prąd
2012	UK [108]	Rezystancyjny	Nexans SC	12 kV	400 A
2013	Niemcy [109]	Rezystancyjny	Nexans SC	12 kV	2,3 kA
2015	Włochy [110]	Rezystancyjny	RSE	9 kV	1 kA

2.7.5. Systemy transportowe

Nadprzewodnikowe systemy transportowe mogą stać się bardzo atrakcyjną formą transportu w niedalekiej przyszłości, głównie za sprawą parametrów technicznych, jakie można osiągnąć poprzez implementację nadprzewodników. Istotną zaletą technologii lewitacji magnetycznej są takie kwestie jak brak tarcia, hałasu oraz bezdotykowy tryb pracy.

Systemy transportowe wykorzystujące łożyska magnetyczne umożliwiają poruszanie się pociągów z prędkością około 600 km/h [111]. Na Rys. 2.21 zaprezentowano przykładowe, działające systemy oparte o technologie MAGLEV [112]. Zaprezentowano reprezentantów systemów superszybkich i wolnobieżnych.



Rysunek 2.21. Przykład superszybkich pociągów od lewej Shanghai high-speed Maglev- linia demonstracyjna oraz Changsha wolnobieżny pociąg Maglev [112].

Pociągi Maglev stanowią rewolucję w transporcie, oferując szybkie i efektywne przemieszczanie się pasażerów między miastami i lotniskami. Dzięki ciągłemu rozwojowi technologii nadprzewodników i lewitacji magnetycznej, przyszłość transportu Maglev wygląda obiecująco, przyczyniając się do bardziej zrównoważonej i ekologicznej mobilności na całym świecie [113].

3

Wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe HTS

W rozdziale zawarto podstawowe informacje o wysokotemperaturowych taśmach nadprzewodnikowych oraz porównano na bazie dostępnych danych (High-temperature superconducting wire critical current database) [114] wybrane taśmy HTS 2G celem przedstawienia różnic w zakresie anizotropii kątovej prądów krytycznych oraz oddziaływania pola magnetycznego na wartość I_c .

W pierwszej części rozdziału dokonano podziału taśm HTS na taśmy pierwszej i drugiej generacji (Rozdział 3.1). Kolejno przedstawiono wybrane metody produkcji taśm HTS, w których wskazano różnice pomiędzy taśmami oraz wady i zalety każdej z metod (Rozdział 3.2).

Analizę porównawczą taśm przeprowadzono celem wskazania różnic w komercyjnie dostępnych taśmach różnych producentów. Analiza została przeprowadzona dla taśm o szerokości 4 mm (Rozdział 3.3). W Rozdział 3.4 wykorzystano wyniki opisane w Rozdział 3.3 celem porównania ich z dostępnymi modelami opisującymi anizotropię prądów krytycznych. Przetestowano sześć różnych modeli prądów krytycznych, z których trzy stanowiły nowe opisy numeryczne zaproponowane przez autora. Rozdział został podsumowany porównaniem modeli anizotropii prądów krytycznych w odniesieniu do danych prądów uzyskanych pomiarowo celem określenia najlepszego modelu dla danej taśmy HTS (Rozdział 3.5).

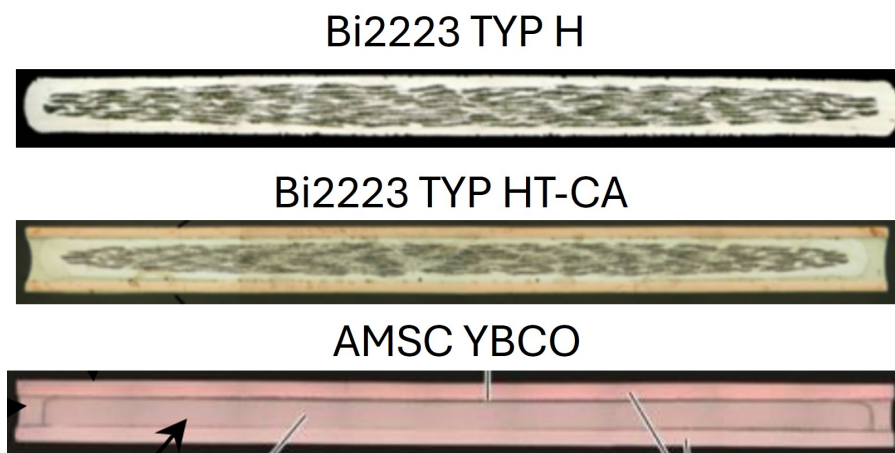
3.1. Podział taśm HTS

Wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe dzieli się na taśmy pierwszej generacji, do których zaliczyć można taśmy BiSCCO oraz taśmy drugiej generacji, do których zaliczyć można taśmy YBCO. Poszczególne taśmy różnią się między sobą między innymi technologią produkcji, budową wewnętrzną oraz parametrami technicznymi, zarówno mechanicznymi, jak i elektrycznymi.

W procesie produkcji taśm 1G wykorzystuje się srebrną matrycę wewnątrz której umieszczony jest materiał nadprzewodnikowy. Technologia produkcji taśm to najczęściej proces PIT (*Powder In Tube*). Na Rys. 3.1 zaprezentowano dwa przekroje poprzeczne taśm BiSCCO, w których widoczne są filamenty nadprzewodnikowe. Kształt obszaru, w którym umieszczone są filamenty zbliżony jest do elipsy. Taśma Bi2223 typ HT-CA posiada dodatkowo powłokę wzmacniającą wykonaną z miedzi i przy podobnych wielkościach prądu krytycznego I_c charakteryzuje się lepszymi parametrami mechanicznymi.

Taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji są taśmami wielowarstwowymi, do nanoszenia których wykorzystuje się różne techniki. Analizując przekrój poprzeczny taśmy 2G można zauważyć, iż materiał nadprzewodnikowy jest bardzo cienką warstwą. Warstwę nadprzewodzącą oraz pozostałe warstwy buforowe i stabilizacyjne najczęściej nanosi się na niemetaliczne podłoże. Wśród najpopularniejszych metod produkcji można wyróżnić RABiTS (*Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates*), PLD (*Pulsed Laser Deposition*) oraz IBAD (*Ion-Beam-Assisted Deposition*).

Na Rys. 3.1 przedstawiono przekrój poprzeczny taśmy, w której 2-mikronowa warstwa nadprzewodnika jest osadzona na metalowym podłożu o grubości 50 – 100 μm . Taki rodzaj budowy taśmy niesie za sobą kilka wad, wśród których można wyróżnić wysoki współczynnik kształtu odpowiadający za znaczne straty magnetyzacji AC.

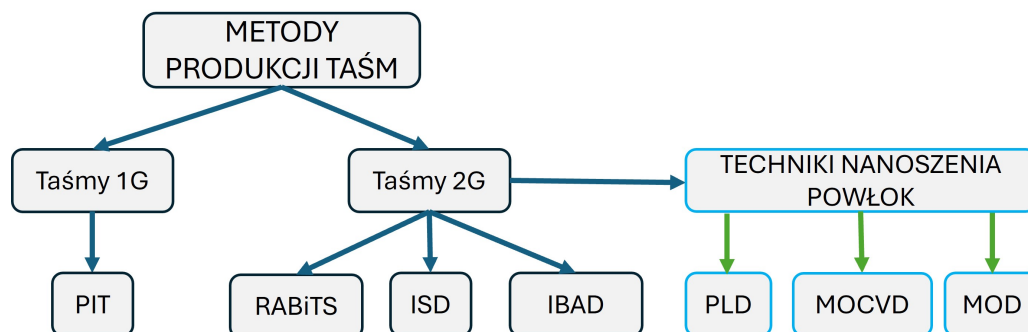


Rysunek 3.1. Przekrój poprzeczny struktury taśm: a) Bi2223 typu H, b) Bi2223 typu HT-CA, YBCO produkcji AMSC [115, 116].

W wysokotemperaturowych taśmach nadprzewodnikowych parametry techniczne zależą zarówno od założonej szerokości taśmy, jak i od procesu produkcyjnego. Obecne procesy produkcyjne pozwalają wytwarzać przewody nawojowe HTS o długościach przekraczających 1 km. W perspektywie długoterminowej producenci taśm dążą do zwiększenia możliwości produkcyjnych oraz jednocześnie minimalizacji kosztów, gdyż obecna cena taśm HTS oscyluje w granicach 50-100 (\$/kAm) [9].

3.2. Przegląd metod produkcji taśm HTS

Producenci taśm HTS, tacy jak American Superconductors (AMSC), Bruker, Fujikura, SuNAM, SuperOX Superpower i Theva, wykorzystują różne procesy technologiczne w celu wytworzenia przewodów nawojowych o jednorodnych właściwości na całej swojej długości. Zaprezentowane na Rys. 3.2 wybrane metody produkcji taśm HTS zostaną pokrótce scharakteryzowane w dalszej części rozdziału.



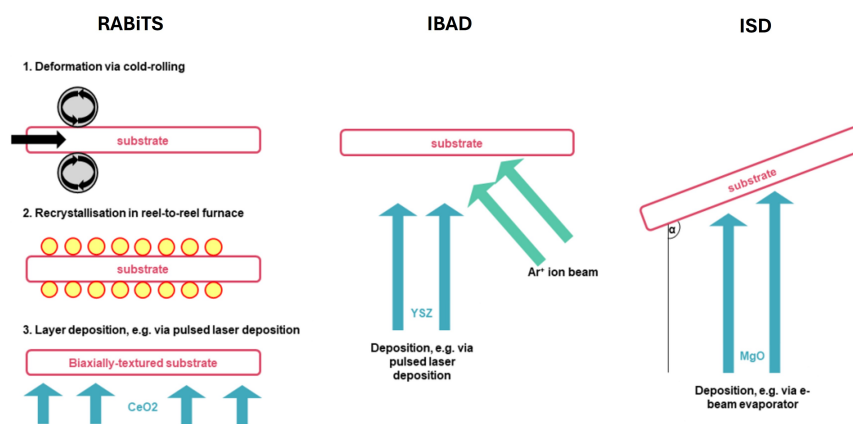
Rysunek 3.2. Wybrane metody produkcji taśm HTS wraz z technikami nanoszenia powłok cienkowarstwowych.

Metodę PIT wykorzystuje się głównie do produkcji taśm BiSCCO. Polega ona na umieszczeniu materiału nadprzewodnikowego w postaci proszku wewnątrz metalowej rurki, zazwyczaj wykonanej z srebra. Rurka pełni dwie funkcje: odprowadza ciepło oraz poprawia właściwości mechaniczne taśmy. Następnie materiał jest wielokrotnie ściskany, prasowany i rozciągany, aby uzyskać pożądany kształt. W przypadku przewodów wielowłóknowych, włókna są splecione między sobą w celu redukcji strat, a następnie prasowane w celu nadania ostatecznego docelowego kształtu. W efekcie uzyskuje się multiflamentowy nadprzewodnik o dobrych parametrach mechanicznych, który z uwagi na obecności słabych połączeń i przypadkową orientację ziaren jest podatny na pole magnetyczne [117, 118].

Do produkcji taśm HTS 2G wykorzystuje się znacznie więcej metod produkcji. Metoda RABiTS (*Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates*) polega na walcowaniu metalowego substratu w celu uzyskania dwuosiowej tekstury. Na tak przygotowany substrat nakładane są kolejne warstwy: buforowa, nadprzewodząca oraz ochronna. Dzięki tej technice można uzyskać taśmy nadprzewodnikowe z dobrze zdefiniowaną orientacją kryształów, co zwiększa efektywność i stabilność nadprzewodnika. Z kolei w metodzie IBAD (*Ion-Beam-Assisted Deposition*) strumień jonów wspomaga osadzanie cienkich warstw na substracie, niklowo-wolframowym bądź wykonanym z Hastelloy [119]. Pozwala to na kontrolę mikrostruktury i orientacji ziaren w warstwie nadprzewodzącej. Metoda ta jest często stosowana do tworzenia warstw buforowych na substratach bez naturalnej dwuosiowej tekstury. Pozwala na produkcję wysokiej jakości taśm nadprzewodnikowych na szeroką skalę. Przykładowo, w przypadku projektowania cewek nadprzewodnikowych, biorąc pod uwagę kryterium strat magnetyzacji, korzystniej jest zastosować taśmy wyprodukowane w technologii IBAD [120].

Powyższe metody zakładały horyzontalne umieszczenie substratu. Opracowano również metody, w których substrat umieszczany jest pod kątem względem kierunku osadzania warstw. Metoda ISD (*Inclined Substrate Deposition*) [121], umożliwia kontrolę nad mikrostrukturą i orientacją ziaren w cienkich warstwach. Dzięki tej metodzie możliwe jest przesunięcie ekstremów lokalnych prądów, co jest przykładowo wykonywane przez producenta

THEVA. ISD jest wykorzystywany głównie do produkcji taśm nadprzewodnikowych II generacji, gdzie istotne jest osiągnięcie wysokiej jakości struktury warstwowej z dobrze zdefiniowanymi właściwościami elektrycznymi i mechanicznymi. Sam proces jest bardzo skomplikowany co może być ograniczeniem w produkcji taśm na dużą skalę. Umożliwia on jednak tworzenie biaxialnie teksturyzowanych taśm. Schematyczna reprezentacja wyżej wymienionych metod została przedstawiona na Rys. 3.3, wskazując na różnice pomiędzy metodami. Do nanoszenia cienkich warstw używane są różne techniki, z których wybrane przedstawiono poniżej.



Rysunek 3.3. Schematyczne porównanie technik produkcji taśm warstwowych a) RABiTS, b) IBAD, c) ISD [122].

W Technice PLD (Pulsed Laser Deposition) silnie skoncentrowany impuls laserowy uderza w materiał, w wyniku czego powstaje plazma. Materiał z plazmy osadza się na podłożu, tworząc cienką warstwę. Technika PLD jest ceniona za możliwość tworzenia bardzo czystych i dobrze zdefiniowanych struktur materiałowych, w tym nadprzewodników wysokotemperaturowych [123].

Proces MOCVD (*metalorganic chemical vapour deposition*) wykorzystuje lotne związki metaloorganiczne, które są transportowane do komory reakcyjnej za pomocą gazu nośnego. W komorze te związki rozkładają się na powierzchni podłoża, tworząc cienką warstwę. Metoda ta jest szczególnie ceniona za możliwość precyzyjnej kontroli grubości i składu chemicznego osadzanych powłok, co czyni ją bardzo wartościową dla produkcji półprzewodników i diod LED [124]. Dla produkcji taśm HTS, proces polega na osadzaniu warstw nadprzewodzących na metalowych taśmach. Zalety MOCVD obejmują dobrą kontrolę wzrostu, możliwość osadzania na obiektach niepłaskich oraz koszty odpowiednie dla środowiska przemysłowego. Wyzwaniem dla metody MOCVD jest tworzenie się ziaren o orientacji osi a w strukturze orientowanej względem osi c , co zwykle ma miejsce w grubych taśmach [125, 126].

Ostatnią z przedstawionych technik nanoszenia powłok cienkich warstw, wykorzystanych przy produkcji taśm HTS, jest technika MOD (*Metal Organic Decomposition*). Ten proces polega na używaniu metaloorganicznych prekursorów, które są nakładane na podłożę, a następnie termicznie rozkładane do formy metalicznej. Jest to stosunkowo prosta i ekonomiczna metoda, pozwalająca na precyzyjne kontrolowanie składu i właściwości powłoki [127].

Każda z wyżej wymienionych technik ma swoje charakterystyczne cechy i jest odpowiednia do różnych zastosowań, w zależności od wymaganych właściwości końcowego produktu. Metoda MOD charakteryzuje się niskimi kosztami i łatwością skalowalności, natomiast posiada ograniczenia w zakresie jakości i jednorodności pola. Metoda MOCVD nadaje się do

produkcji przy wyższych prędkościach, co stanowi kluczowy czynnik związany z procesem produkcji taśm niemniej jest bardziej niestabilna i wymaga zwrócenia uwagi na kontrolowanie warunków wzrostów taśm, nadprzewodnikowych. Metoda PLD cechuje się wysoką jakością kryształów i gładką powierzchnią, posiada jednak ograniczenia w postaci wysokich kosztów i skalowalności.

3.3. Zależności kątowe prądu krytycznego wybranych taśm HTS

Wartość prądu krytycznego I_c w przypadku taśm HTS definiowana jest zwyczajowo przez producenta jako wartość prądu dla taśmy pracującej w polu własnym, związanym z przepływem prądu transportu przy temperaturze 77 K. Niemniej jednak w kartach charakterystyk nie podaje się informacji o wpływie oddziaływania pola magnetycznego na redukcję prądów krytycznych w funkcji amplitudy pola i jego kąta. Zasadniczo istnieją dwie metody, którymi można się posłużyć przy doborze typu taśmy do aplikacji: a) dokonanie charakteryzacji taśm w laboratorium (Rozdział 6), b) wykorzystanie danych dostępnych w literaturze dla badanego typu taśm, opisaną w poniższej części pracy.

Porównanie parametrów taśm HTS zrealizowano w oparciu o ogólnodostępną bazę danych, zawierającą wyniki charakteryzacji taśm [114], w której pomiary wykonaną taką samą techniką pomiarową. Do realizacji pomiarów wykorzystano system pomiarowy umożliwiający badania w zakresie pola magnetycznego 0 – 8 T oraz w zakresie temperatur 20 – 90 K.

Analizę taśm HTS wykonano przy uwzględnieniu następujących założeń zawężających.

- Temperatura taśmy w czasie pomiarów 77 K, odpowiadająca temperaturze wrzenia ciekłego azotu;
- Wartość indukcji magnetycznej jednorodnego pola magnetycznego: 0 T; 0,2 T; 0,3 T; 0,5 T; 1 T;
- Kąt ułożenia taśmy względem linii sił pola magnetycznego z zakresie 0–240° (ograniczenie konstrukcyjne stanowiska);
- 0° - pole magnetyczne skierowane prostopadle do szerszego boku taśmy HTS próbki, 90° - pole magnetyczne skierowane równoległe do dłuższego boku taśmy HTS).

Dokonano wyboru taśm HTS cechujących się podobną szerokością (4 mm oraz 4,4 mm). Badania porównawcze były realizowane na próbkach o długościach 6 cm i 4 cm. Szczegółowe dane oraz oznaczenie poszczególnych próbek zamieszczono w Tabeli 3.1. Zestawiono informacje o kraju producenta taśm, użytym nadprzewodniku, wykorzystanym podłożu, informacje elektryczne, takie jak wartość prądu krytycznego i informacje mechaniczne, takie jak grubość substratu i grubość taśmy.

Taśmy produkcji SuNAM cechują się największą wartością prądu krytycznego, dwukrotnie przekraczającą wartość prądu w taśmach SuperPower. Większość producentów wykorzystuje itr do produkcji taśm nadprzewodnikowych. W przypadku SuperOx oraz Theva wykorzystywany jest także gadolin. Może to być uzasadnione faktem, że gadolin jest rzadszym pierwiastkiem niż itr i jest trudniej dostępny.

W większości przypadków jako podłoże taśm 2G wykorzystuje się Hastelloy C-276, czyli opracowany przez Haynes International materiał składający się głównie z niklu ($\approx 57\%$),

chromu ($\approx 16\%$), molibdenu ($\approx 16\%$), żelaza ($\approx 5\%$), wolframu ($\approx 4\%$), kobaltu ($< 2.5\%$) oraz mniejszych ilości manganu, krzemu i węgla ($< 1\%$ każdego) [128]. Ta specyficzna mieszanka pierwiastków nadaje strukturze wyjątkowe właściwości, takie jak odporność na utlenianie oraz korozję spowodowaną przez kwasy. W przypadku American Superconductor wykorzystywane jest podłoże niklowe z pięcioprocentową lub dziesięcioprocentową domieszką wolframu, który poprawia właściwości mechaniczne i termiczne stopu podłoża.

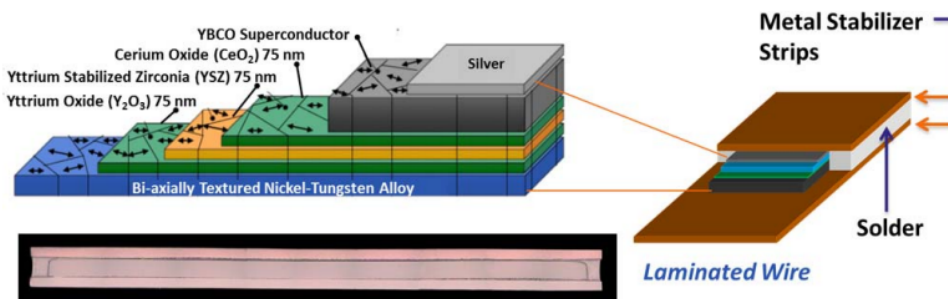
Tabela 3.1. Tabelaryczne zestawienie analizowanych taśm oraz parametry mechaniczne i elektryczne.

	American Superconductor	Shanghai Superconductor	SuNAM	SuperOx	SuperPower
Kraj	USA	Chiny	Korea Płd.	Japonia	USA
Max I_c @ 77 K	415 A	520 A	800 A	510 A	380 A
Nadprzewodnik	YBCO	YBCO	YBCO	GdBCO YBCO	YBCO
Substrat	Ni5W Ni9W	Hastelloy C276	Hastelloy C276	Hastelloy C276	Hastelloy C276
Grubość substratu μm	50; 75	30; 50	60; 105	40; 60; 100	30; 50
Grubość taśmy μm	170 - 360	65 - 225	60 - 270	60 - 100	32 - 162
Szerokość taśmy mm	4,4; 4,8; 12	2 - 10	4; 12	4; 6; 12	2; 4; 6; 12
Max. długość taśmy m	500	500	150	600	900

W dalszej części pracy krótko scharakteryzowano poszczególne taśmy. Charakterystyka dotyczy: zależności katowej prądów krytycznych I_c , wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na redukcję wartości prądów krytycznych, wykładników potęgowych n oraz budowy taśm HTS.

3.3.1. American Superconductor

Taśma AMSC Amperium Type 8700 Brass Laminated Cable Formulation 2G HTS, wykonana w technologii RABiTS, w której warstwy nadprzewodnika $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 - \delta$ o grubości $0,8 \mu\text{m}$ domieszkowano nanocząsteczkami Dy_2O_3 , osadzonymi w procesie osadzania metaloorganicznego (MOD). Na Rys. 3.4 przedstawiono dane producenta dotyczące budowy wewnętrznej taśmy oraz jej przekroju poprzecznego. Na Rys. 3.4 widoczne są poszczególne warstwy. Taśmy dedykowane są do zastosowań w kablach niskonapięciowych AC/DC [129].



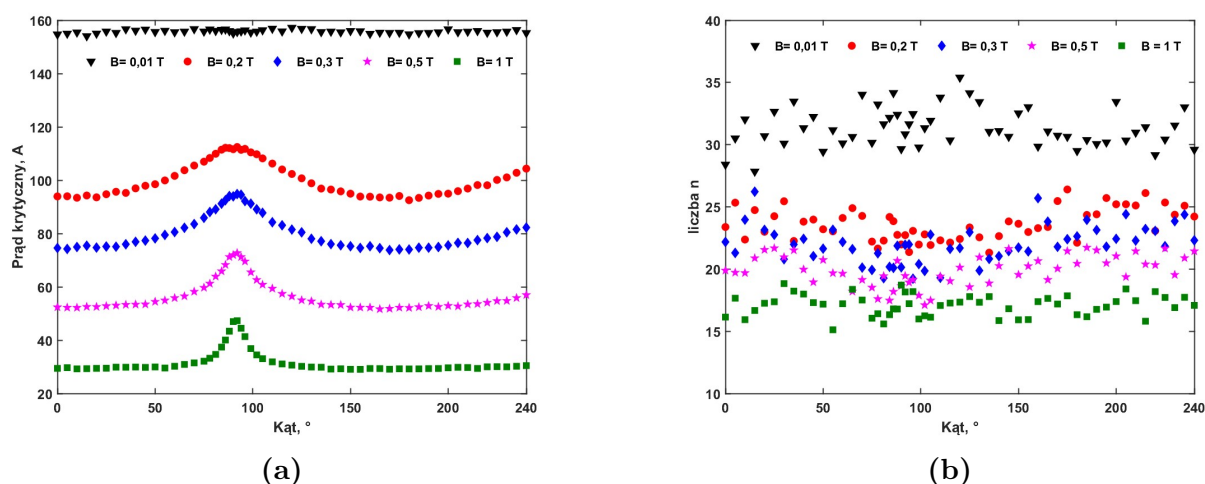
Rysunek 3.4. Budowa wewnętrzna taśmy AMSC oraz zdjęcie przekroju poprzecznego taśmy [129].

Na Rys. 3.5a zaprezentowano wyniki pomiarów zależności katowej prądów krytycznych dla wybranych wartości pola magnetycznego. Wartość prądu krytycznego w polu własnym taśmy

jest na poziomie 155 A. Zwiększenie wartości przyłożonego pola magnetycznego do poziomu 200 mT powoduje znaczną redukcję prądu krytycznego mieszczącą się w zakresie 29 – 40%.

Zgodnie z założeniami teoretycznymi wartości maksymalne prądu obserwowane są dla kąta 90° odpowiadającego ułożeniu taśmy równolegle z liniami sił pola magnetycznego. W taśmach ASMC można zaobserwować postępująca wraz ze wzrostem indukcji stromość narastania prądów krytycznych w okolicach kąta 90° oraz postępujące wypłaszczenie dla innych kątów.

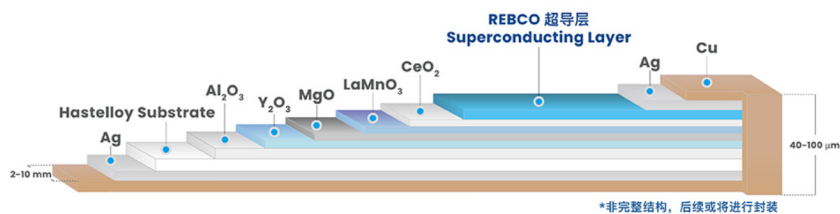
Przedstawiona na Rys. 3.5a wartość wykładnika potęgowego n określającego nachylenie charakterystyki prądowo-napięciowej (E-J) opisanej we wcześniejszej części pracy. Wartości współczynnika maleją wraz z wartością przyłożonego pola magnetycznego.



Rysunek 3.5. (a) Wartości prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$ oraz (b) wartości wykładnika $n(B, \theta)$ w taśmie AMSC Amperium Type 8700.

Spadek wartości współczynnika n związany z rosnącą penetracją nadprzewodnika przez pole magnetyczne jest typowy. Przy wzroście wartości pola magnetycznego, poszerzeniu ulega obszar mieszany, przez maleje wartość prądu krytycznego I_c . Współczynnik potęgowy przyjmuje wartości w zakresie 15-35, przy czym nie zaobserwowano tendencji związanej z znaczącą zmianą współczynnika w funkcji kąta θ .

3.3.2. Shanghai Superconductor



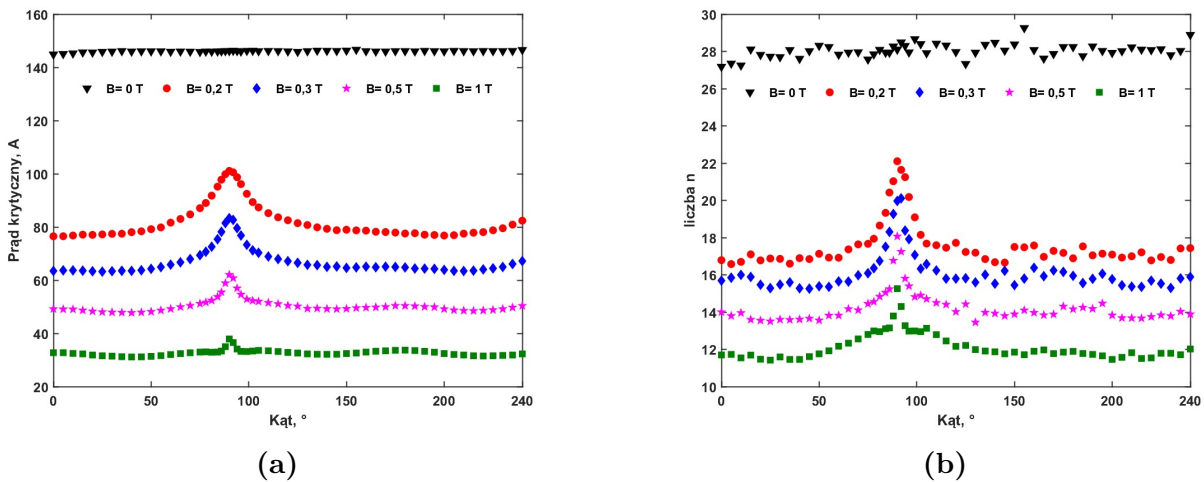
Rysunek 3.6. Budowa taśmy Shanghai Superconductor wraz z wyszczególnionymi warstwami [130].

Taśma Shanghai Superconductor PA1212 2G HTS, o szerokości 4 mm, wyprodukowana została przy użyciu metody fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD). Charakteryzuje się

stratami na poziomie 0,36 – 0,5 W/m. Na Rys. 3.6 zilustrowano wielowarstwową strukturę tej taśmy. Na podłożu o grubości 30 μm umieszczone są kolejno warstwy: Al_2O_3 - bariera izolacyjna zapobiegająca dyfuzji zanieczyszczeń, Y_2O_3 -warstwa buforowa wspomagająca orientację tekstury krystalograficznej, MgO - buforowa, wspomagająca wyrównanie naprężeń, LaMnO_3 - działająca jako warstwa stabilizująca, CeO_2 - pomagająca w uzyskaniu odpowiedniej tekstury i orientacji warstwy nadprzewodzącej i Ag- zapobiegająca utlenianiu. Dodatkowo, dla poprawy właściwości mechanicznych oraz stabilizacji termicznej, zastosowano stabilizator miedziany, który otacza wszystkie warstwy taśmy. Grubość warstwy stabilizatora wynosi około 10 μm [130].

Na Rys. 3.7a zaprezentowano wyniki pomiarów zależności kątowej prądów krytycznych, które w odróżnieniu od wyników zaprezentowanych na Rys. 3.5a cechują się różnicą między wartością maksymalną i minimalną prądu w funkcji przyłożonego pola. Można zauważyć, iż dla pola w okolicach 1 T nie występuje znacząca różnica prądów krytycznych względem orientacji taśmy. W przypadku pola własnego, prąd I_c osiąga wartość na poziomie 146 A. Maksymalna wartość prądu krytycznego osiągana jest przy kącie 90°. Przyjęto, że redukcja wartości krytycznej wynosi około 10 – 12 A na każde 100 mT.

Największy spadek wartości prądu krytycznego obserwowany jest 0 T a 0,2 T. Na przykład, wartość średnia zmniejsza się z 146,1 A przy 0 T do 82,68 A przy 0,2 T. Oznacza to, że pole magnetyczne ma znaczący wpływ na prąd krytyczny nawet przy niskich wartościach pola.



Rysunek 3.7. (a) Wartości prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$ oraz (b) wartości wykładnika $n(B, \theta)$ w taśmie Shanghai Superconductor PA1212.

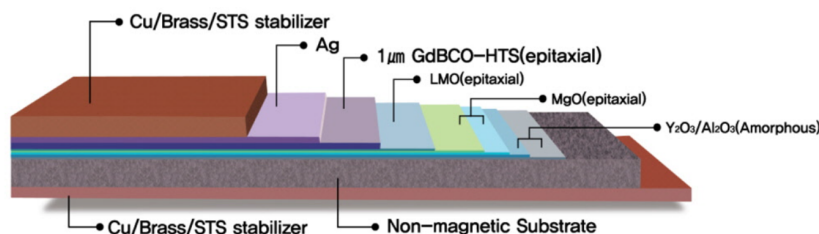
Wykładnik potęgowy n w przypadku analizowanej taśmy mieści się w zakresie 12-35. Podobnie jak w przypadku taśmy AMSC jego wartość maleje wraz ze wzrostem przyłożonego pola magnetycznego. W przypadku badanej taśmy widoczna jest zależność wykładników potęgowych od wartości prądów krytycznych (Rys. 3.7b). Stromość tej charakterystyki jest wyższa niż stromość prądów krytycznych.

3.3.3. SuNAM 2G HTS Wire

Taśma SuNam produkcji południowokoreańskiej o numerze katalogowym SAN04200-161031-01 została poddana analizie w zakresie anizotropii prądów krytycznych. Jest to kolejny przykład taśmy wielowarstwowej. W przypadku SuNam warstwy są nakładane

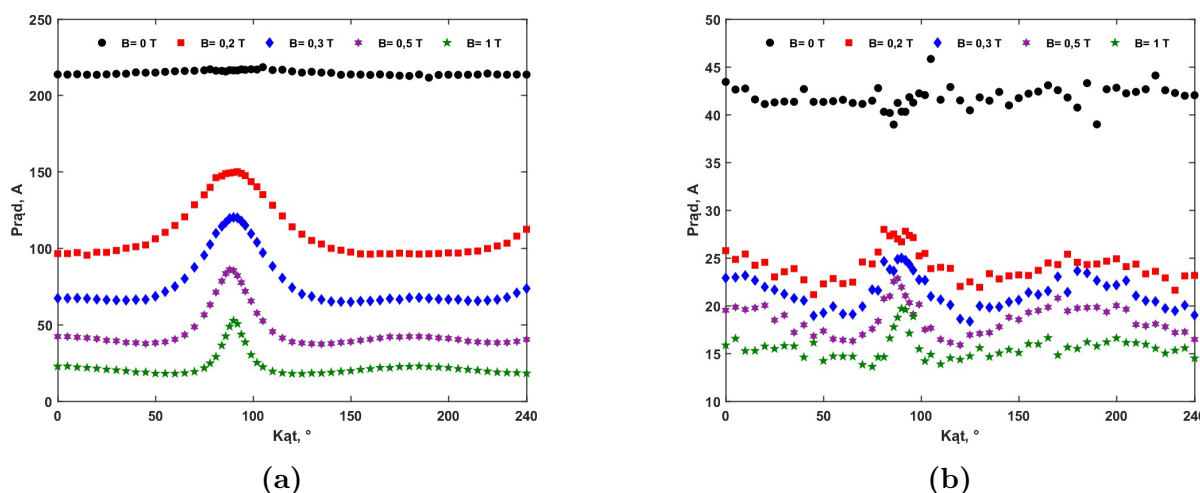
na niemagnetyczne podłoże, a proces tworzenia taśmy odbywa się metodą Multi-turn R2R (Roll-to-Roll). W ramach procesu, elementy takie jak ren (Re), miedź (Cu) i bar (Ba) są stopniowo naporowywane na taśmę w specjalnie zaprojektowanym piecu. Kontrola procesu jest zapewniona poprzez komputerowy program zwrotny, który monitoruje i reguluje warunki w piecu, w tym prędkość przesuwu taśmy, zapewniając optymalną jakość produktu końcowego. Na Rys. 3.8 przedstawiono schematyczną budowę taśmy SuNAM [131]. Grubość warstwy nadprzewodnika wynosi $1\ \mu\text{m}$.

Na Rys. 3.9a przedstawiono kątową zależność prądów krytycznych taśmach SuNAM. Analizę przeprowadzono dla wszystkich analizowanych pól. Analizowana taśma cechuje się bardziej równomierną zależnością kątową, która wraz ze spadkiem pola magnetycznego staje się bardziej stroma. Wartość prądu krytycznego dla pola własnego przekracza $218,6\ \text{A}$, gdy dla indukcji $1\ \text{T}$, wartość maksymalna to $52,7\ \text{A}$. Niemniej wpływ pola magnetycznego na poziomie $300\ \text{mT}$ skutkuje zmniejszeniem wartości prądu krytycznego o ponad $50\ \%$.



Rysunek 3.8. Budowa taśmy SuNAM 2G HTS wraz z wyszczególnionymi warstwami [131].

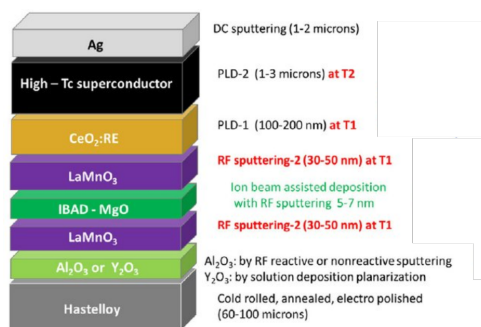
Na Rys. 3.9, przedstawiono charakterystykę kątową wykładnika potęgowego n . Można zaobserwować jego dużą wartość rzędu 45 w przypadku badań w polu własnym. Wartość wykładnika jest funkcją zewnętrznego pola magnetycznego. W przypadku pozostałych niezerowych pól wartości wykładnika oscylowały w zakresie 15 - 25 . Największe wartości wykładnika są skorelowane z maksymalnymi wartościami prądów krytycznych.



Rysunek 3.9. (a) Wartości prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$ oraz (b) wartości wykładnika $n(B, \theta)$ w taśmie SuNAM SAN04200-161031-01.

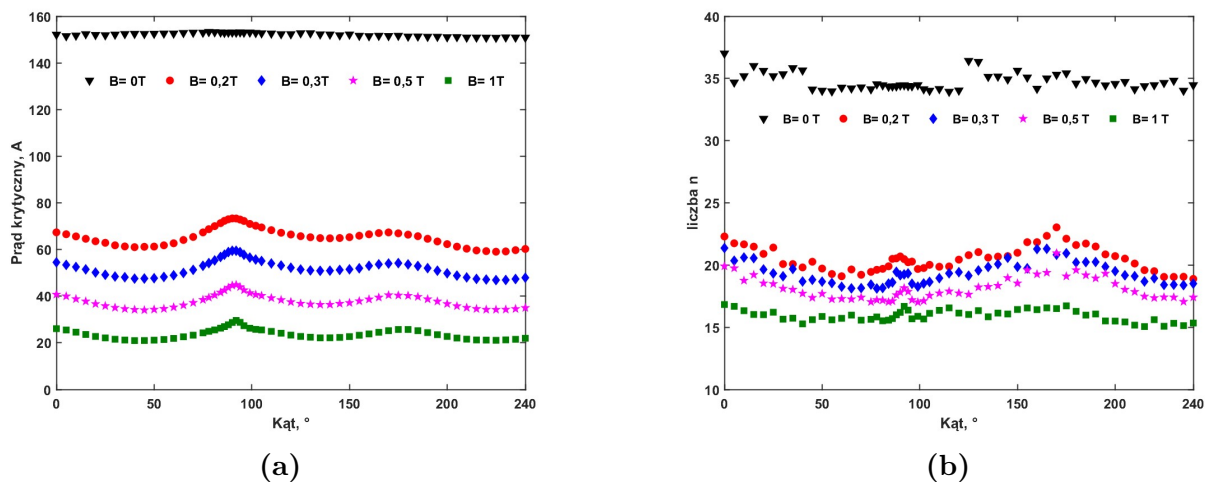
3.3.4. SuperOx 2G HTS

Taśmy SuperOx 2G, które wykonywane są w technologiach takich, jak współosiowa depozycja laserowa (PLD), depozycja z fazy gazowej (CVD) lub rozpylanie magnetronowe zostały opisane w niniejszej części pracy. Są to taśmy wielowarstwowe, gdzie na podłożu najpierw nakłada się warstwy buforowe, które pomagają w dopasowaniu parametrów sieci krystalicznej między podłożem, a warstwą nadprzewodzącą. Następnie nakłada się warstwę nadprzewodzącą GdBCO i dodatkowe warstwy funkcjonalne, które mogą wpływać na właściwości, takie jak prąd krytyczny. Schematyczną budowę prezentującą poszczególne warstwy przedstawiono na Rys. 3.10. Dodatkowo zawarto informacje o grubościach poszczególnych warstw [132].



Rysunek 3.10. Struktura budowy warstwowej taśm SuperOx z informacją o grubości warstw [132].

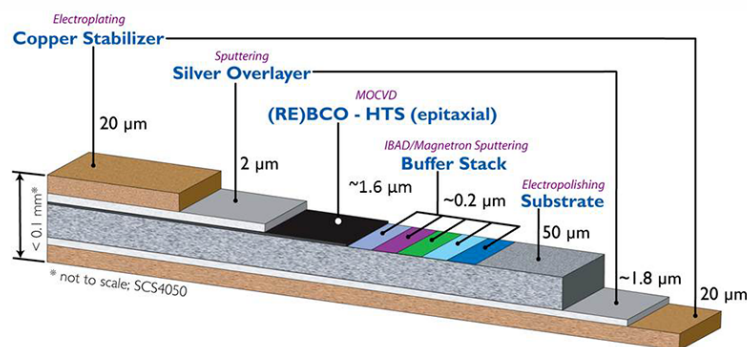
Na Rys. 3.11a pokazano, jak wartości prądu krytycznego zmieniają się w zależności od kąta oraz wielkości przyłożonego pola magnetycznego. W odróżnieniu od uprzednio opisanych taśm, zauważalne jest drugie ekstremum w okolicy kąta 180°. Taśma ta charakteryzuje się też względnie małą zmiennością wartości prądów krytycznych pomiędzy ich maksymalnymi i minimalnymi wartościami. Cecha ta jest korzystna szczególnie w aplikacjach, w których zakłada się różną orientację taśmy względem pola magnetycznego, co należy uwzględnić przy doborze punktu pracy. W taśmach SuperOx obserwuje się znaczną redukcję prądów krytycznych, większą niż w innych taśmach.



Rysunek 3.11. Wartości prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$ oraz (b) wartości wykładnika $n(B, \theta)$ w taśmie SuperOx.

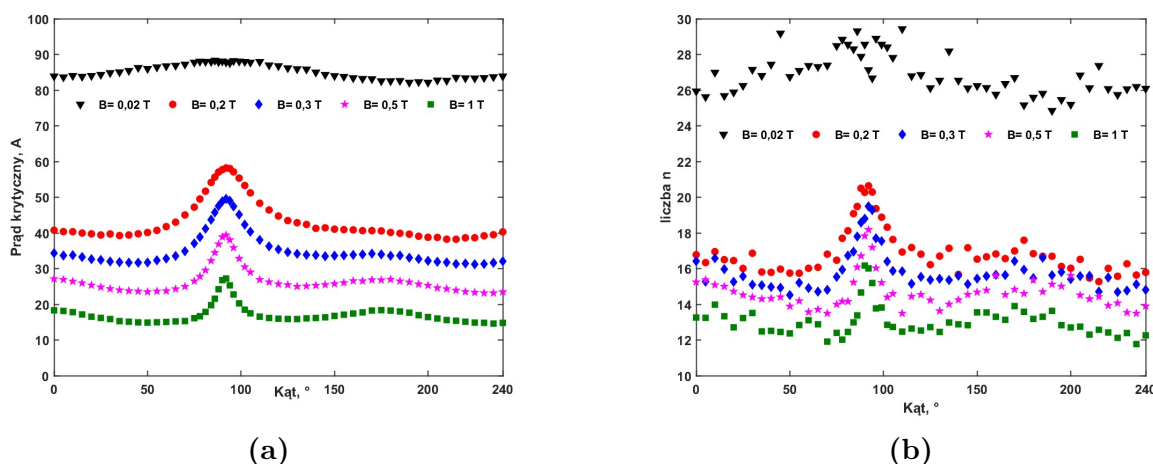
Na Rys. 3.11b przedstawiono charakterystykę kątową wykładnika potęgowego n . W przypadku niezerowych wartości pola magnetycznego wartość wykładników oscyluje na poziomie 15-25. Wykładniki potęgowe przyjmują maksymalne wartości dla kąta 180° . Co istotne, maksymalne wartości nie są skorelowane z maksymalnymi wartościami prądów, jak to miało miejsce we wcześniej opisanych taśmach. Maksymalne wartości występują w punktach zbieżnych z drugim ekstremum lokalnym, w okolicy 180° .

3.3.5. SuperPower Advanced Pinning



Rysunek 3.12. Schematyczna ilustracja budowy wewnętrznej taśmy SuperPower Advanced Pinning [133].

Taśma produkcji SuperPower, w której zastosowano specjalne metody pinningu, odpowiadające za polepszenie właściwości taśm HTS. Taśma charakteryzuje się wielowarstwową strukturą, w której warstwa nadprzewodząca o grubości $1,6 \mu\text{m}$ umieszczona na substracie, powleczone jest warstwą stabilizatora. Taśmy są wykonane w formule REBCO, dostępne w różnych szerokościach od 2 mm do 12 mm, z długościami pojedynczego fragmentu od 200 m do ponad 900 m, w zależności od specyfikacji. Wyróżnia się dwa typy: SF (Stabilizer Free) i SCS (Surround Cu Stabilizer), z elektroplatinowanym stabilizatorem miedziowym o grubości od $10 \mu\text{m}$ do $110 \mu\text{m}$.

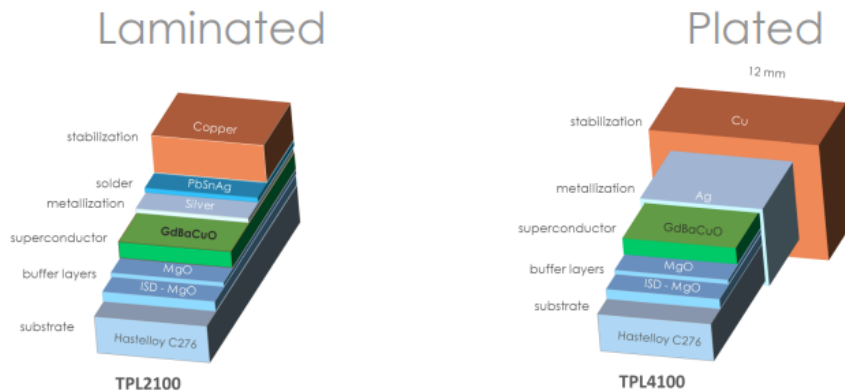


Rysunek 3.13. Wartości prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$ oraz (b) wartości wykładnika $n(B, \theta)$ w taśmie SuperPower.

Krytyczny prąd (I_c) dla taśm AP wynosi od 120 A/4 mm do 160 A/4 mm przy 77 K. Analizując właściwości mechaniczne, taśmy te mają wytrzymałość na rozciąganie do 550 MPa i minimalną średnicę zginania od 6 mm do 11 mm, w zależności od grubości podłoża. Na Rys. 3.12b przedstawiono schematyczną strukturę taśmy HTS z podaniem grubości poszczególnych warstw [133, 134]. Podobnie jak w przypadku wcześniej wymienionych taśm, również taśmy SuperPower cechują się silną anizotropią, która zależy od zastosowanej metody pinningu i znaczną redukcją prądu krytycznego. Wartość wykładnika potęgowego jest zbieżna z wartością prądu krytycznego i osiąga wartości maksymalne w tych samych położeniach kątowych co maksima prądu krytycznego. Należy zauważyć, iż w przypadku pola własnego obserwowano odchylenia od stałej wartości wykładnika, co wynika z faktu fluktuacji w pomiarze prądu krytycznego dla pola własnego.

3.3.6. THEVA Pro-Line 2G HTS

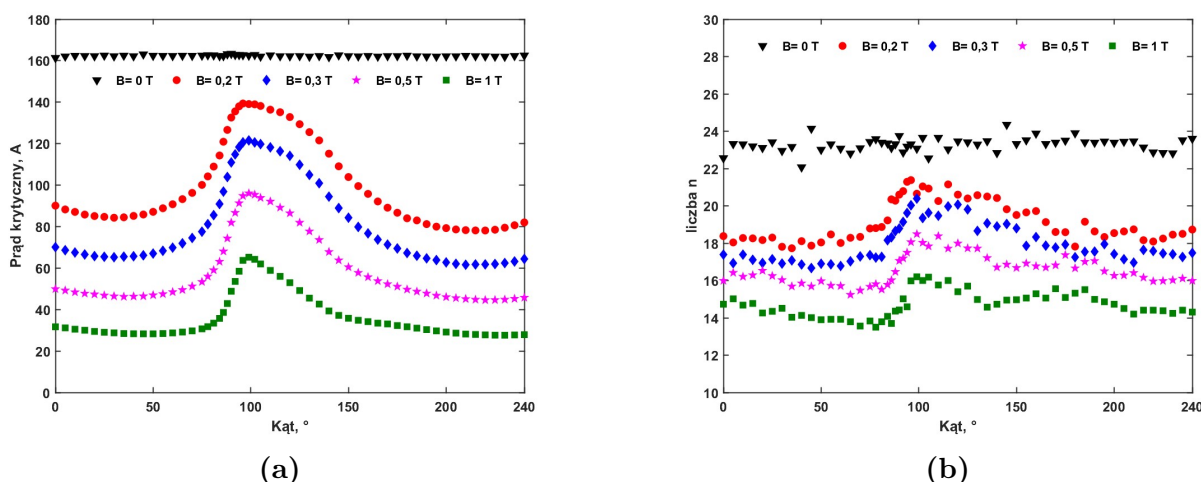
Ostatnim przykładem taśm HTS analizowanych pracy są taśmy THEVA. Opracowane przez niemieckiego producenta taśmy 2G charakteryzują się przesunięciem maksymalnego kąta, przy którym występują maksymalne wartości prądu krytycznego. Jest to opatentowany przez THEVA proces osadzania na skośnym podłożu (ISD). Dzięki zastosowaniu procesu ISD, podłoże jest nachylane względem źródła osadzania, co prowadzi do powstania warstwy MgO o strukturze skośnej. Strukturę wewnętrzną taśm laminowanych oraz powlekanych przedstawiono Rys. 3.14.



Rysunek 3.14. Struktura wewnętrzna taśm THEVA TPL2100 oraz TPL4100.

Orientacja warstwy MgO oraz jej nachylenie są przejmowane przez nadprzewodzącą warstwę HTS. Taki układ powoduje, że oś c warstwy HTS jest nachylona o około 20-30° względem normalnej osi podłoża. Ta specyficzna orientacja ma bezpośredni wpływ na wydajność nadprzewodnika, szczególnie w zakresie zależności krytycznego prądu od kierunku i amplitudy zewnętrznego pola magnetycznego, które zostały przestawnie na Rys. 3.15.

Wyniki pomiarów prądów krytycznych charakteryzują się kształtem znacząco odbiegającym od pozostałych taśm HTS. Widoczne jest, iż wartość prądu krytycznego osiąga swoje ekstrema dla kąta 110°. Dodatkowo nie jest obserwowana symetria w taśmie, jak w innych taśmach. Analizując wykładnik potęgowe, można zauważyć korelacje z prądem krytycznym I_c . Wartość wykładnika potęgowego na poziomie 14-22 jest niższa, niż dla wcześniej opisanych taśm. Widoczne są lokalne ekstrema dla kątów odpowiadających ekstremum prądu.



Rysunek 3.15. Wartości prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$ oraz (b) wartości wykładnika $n(B, \theta)$ w taśmie Theva

Podsumowując, taśmy nadprzewodnikowe różnią się znacząco względem siebie w zakresie anizotropii prądów krytycznych. Różnice głównie odnoszą się do wartości prądów oraz miejsc lokalnych ekstremów jak i redukcji prądów krytycznych w zależności od wartości pola magnetycznego. Współczynnik redukcji dostarcza informacji o względnej wartości prądu krytycznego dla konkretnego pola magnetycznego odniesionej do prądu z krytycznego w polu własnym.

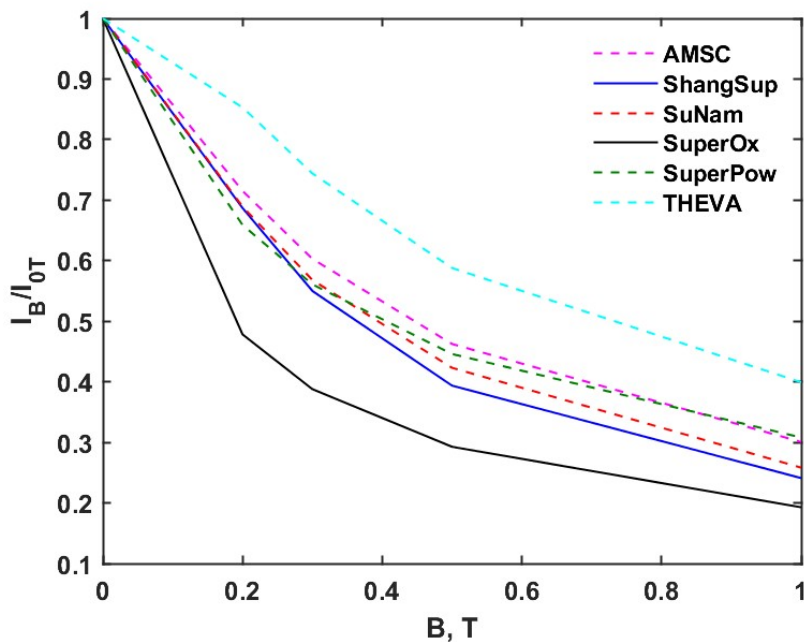
Celem względem wyboru taśmy do badań eksperymentalnych opracowano charakterystyki porównawcze. Na Rys. 3.16 zaprezentowano charakterystykę opisującą redukcję wartości prądów krytycznych w taśmach HTS w stosunku do prądu krytycznego w polu własnym w funkcji przyłożonego pola magnetycznego.

Z charakterystyki kątovej wybrano kąty charakteryzujące wartości maksymalne (110° przy Theva oraz 90° dla pozostałych taśm). Na podstawie zestawionych wyników wykazano, że taśma Theva cechuje się najmniejszą redukcją prądu krytycznego. Odnosi się to jednak tylko do maksimum lokalnych. Z kolei taśma SuperOx cechuje się w tym zakresie najgorszymi właściwościami.

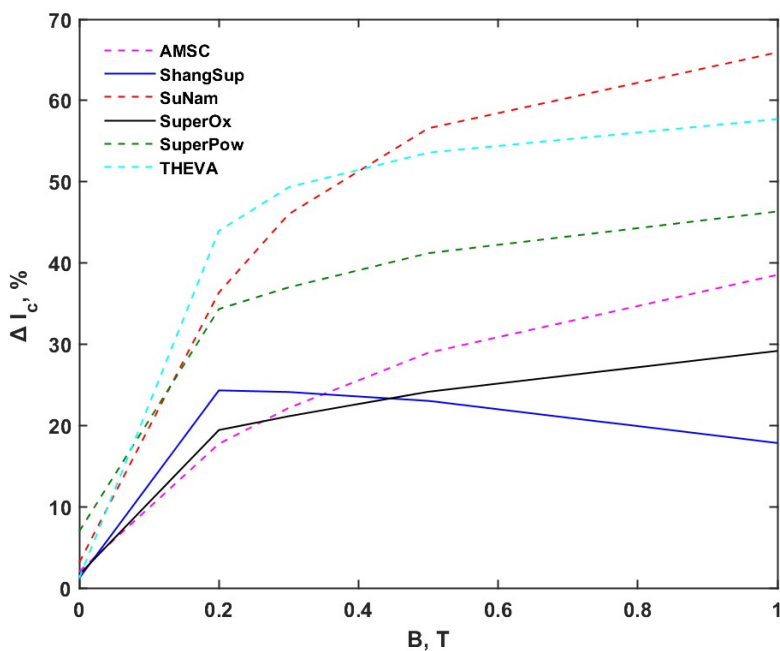
Na podstawie Rys. 3.16 można wykazać ograniczenia w zastosowaniach taśm pracujących w zewnętrznych polach magnetycznych. Przykładowo wykorzystanie taśmy przy zewnętrznym polu magnetycznym 400 mT spada o blisko 50% w każdym z przypadków.

Na podstawie Rys. 3.17 przedstawiono procentową zmianę pomiędzy wartościami maksymalnymi i minimalnymi prądu w funkcji wartości przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego. Taśmy SuNam cechują się największą procentową zmiennością prądu krytycznego w zakresie dużych pól magnetycznych. Z kolei taśmy SuperOx cechują się najlepszymi właściwościami w tym zakresie.

Wyniki porównania wskazują, że wybór taśm HTS do konkretnej aplikacji w procesie projektowania urządzeń nadprzewodnikowych nie jest kwestią trywialną. Jest to szczególnie istotne, gdy w projektowym urządzeniu taśmy HTS przez które przepływa prąd transportu znajdują się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego o różnym kierunku i wartości względem taśm. Prowadzi do konieczności uwzględnienia dużego marginesu bezpieczeństwa pracy doborze ich parametrów znamionowych.



Rysunek 3.16. Porównanie redukcji prądu krytycznego w funkcji przyłożonego pola dla największych zmierzonych wartości I_c .



Rysunek 3.17. Porównanie procentowej różnicy pomiędzy wartością maksymalną i minimalną prądu krytycznego w funkcji przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego dla analizowanych taśm HTS.

3.4. Modele kątowe prądu krytycznego I_c

Badania nad wykorzystaniem modeli numerycznych do opisu zjawiska anizotropii w taśmach HTS są prowadzone nieprzerwanie od wielu lat, czego przykładem mogą być liczne publikacje w tej tematyce [135–137]. W większości przypadków wykorzystywane są powszechnie znane modele, mające na celu odwzorowanie zjawiska z wykorzystaniem znajomości parametrów. W modelach tych dąży się do rozwiązania tak zwanego problemu prostego, polegającego na dopasowaniu wyników pomiarów za pomocą funkcji definiującej model. W efekcie uzyskuje się tablice wartości parametrów umożliwiających najlepsze dopasowanie funkcji do pomiarów. Stosowane są metody proste oraz algorytmy optymalizacyjne celem poszukiwania parametrów funkcji [138, 139]. Zasadniczo dąży się do tego, aby modele były możliwe proste. Niemniej przy skomplikowanych zależnościach, jakie występują w przypadku taśm HTS, w tym z pinningiem, wykorzystuje się także bardziej złożone modele [140].

Podążając za tym trendem przeprowadzono analizę porównawczą dla modeli służących do wyznaczania prądu krytycznego, pochodzących od modeli gęstości prądów krytycznych. Każdy z testowanych modeli zawiera inny zapis matematyczny wpływu anizotropii taśm HTS. Wykorzystano następujące modele:

- **KL** (*Kim-like Model*), jako jeden z najczęściej wykorzystywanych modeli do odwzorowywania zależności kątowej prądów krytycznych w taśmach HTS uwzględniający dwa parametry opisujące termicznie aktywowane procesy pełzania strumienia w taśmach B_{c0} oraz b . (3.1) [141];

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{B}, \theta) = \mathbf{I}_{c0} \left(1 + \frac{|\mathbf{B}|}{B_{c0} \epsilon(\theta)} \right)^{-b} \quad (3.1)$$

- **MAA** (*Magneto-Angular Anisotropy Model*), opisany zależnością ((3.2)). W modyfikacji tej wprowadzono współczynnik α , który można wyznaczyć empirycznie. Określa on jak oddziaływanie pola magnetycznego na I_c . Zakłada się, że współczynnik α jest >0 [142];

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{B}, \theta) = \mathbf{I}_{c0} \left(1 + \left(\frac{|\mathbf{B}|}{B_{c0}} \right)^\alpha \epsilon(\theta) \right)^{-b} \quad (3.2)$$

item **PER** (*Percolation Model*), w którym do opisu zależności wykorzystana została funkcja wykładnicza przy wykorzystaniu podobnych parametrów opisujących anizotropię jak w MAA, przy czym parametr nieliniowości odnosi się bezpośrednio do współczynnika Blattera ϵ (3.2) [142];

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{B}, \theta) = \mathbf{I}_{c0} \cdot \exp \left(- \left(\frac{|\mathbf{B}|}{B_{c0}} \right)^\alpha \epsilon^b(\theta) \right) \quad (3.3)$$

Dodatkowo w oparciu o wymienione wyżej modele zaproponowano autorskie modele analityczne, wykorzystujące model perkolacyjny oraz funkcje trygonometryczne. Wybrano tangens hiperboliczny oraz cosinus hiperboliczny do powiązania funkcji hiperbolicznej z wykładniczą. Modele te oznaczono odpowiednio: *Kim-tanh* (**KTH**) (3.4), *Kim-cosh* (**KCH**) (3.5) oraz *Kim-cosh-power* (**KCP**) (3.6).

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{B}, \theta) = \mathbf{I}_{c0} \cdot \tanh \left(\left(\frac{|\mathbf{B}|}{B_{c0}} \right)^{-\alpha} \epsilon^{-b}(\theta) \right) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{B}, \theta) = \mathbf{I}_{c0} \cdot \cosh^{-1} \left(\left(\frac{|\mathbf{B}|}{B_{c0}} \right)^{\alpha} \epsilon^b(\theta) \right) \quad (3.5)$$

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{B}, \theta) = \mathbf{I}_{c0} \cdot \left[\cosh \left(\left(\frac{|\mathbf{B}|}{B_{c0}} \right)^{\alpha} \epsilon^b(\theta) \right) \right]^{-\left(\frac{|\mathbf{B}|}{B_{c0}} \right)} \quad (3.6)$$

W każdym z wyżej wymienionych modeli wykorzystano funkcje $\epsilon(\theta)$, w celu opisanie właściwości anizotropowych materiałów nadprzewodnikowych. Funkcja ta odnosi się bezpośrednio do parametru anizotropii wyznaczonego w opisie Ginzburga-Landau (2.20). Zastosowano wariację funkcji anizotropia poprzez zastosowanie odpowiednio funkcji ϵ_1 , dla której skupiono się na jednokierunkowym oddziaływaniu anizotropii głównie w kierunku kosinusa oraz ϵ_2 dla której wyróżniono dwukierunkowe właściwości anizotropowe działające w dwóch kierunkach.

$$\epsilon_1(\theta) = \sqrt{k^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta} \quad (3.7)$$

$$\epsilon_2(\theta) = \sqrt{k^2 \cos^2 \theta + l^2 \sin^2 \theta} \quad (3.8)$$

Dobór parametrów modeli przeprowadzono w oparciu o metaheurystyczny algorytm optymalizacyjny nietoperzy (Bat Algorithm) [143]. Nazwa algorytmu pochodzi od inspiracji metody związanej z echolokacją, zwany algorytmem nietoperzy w celu unikania błędów. Z uwagi na zdolność algorytmu do unikania utknięć w lokalnych minimach funkcji oraz efektywność nadaje się on do prowadzonej optymalizacji. Dodatkowo stanowi on nowość w wyszukiwaniu funkcji (w publikacjach L. Rostila [139] i F.Sirois [138] wykorzystano algorytmy Nelder-Mead). Należy zauważyć, że dla zadania poszukiwania parametrów funkcji prądów krytycznych, z uwagi na czasochłonność, nie nadaje się podejście zaproponowane przez F. Grilli [135]. Algorytm wykorzystano do wyznaczania poszczególnych parametrów analizowanych modeli prądów krytycznych.

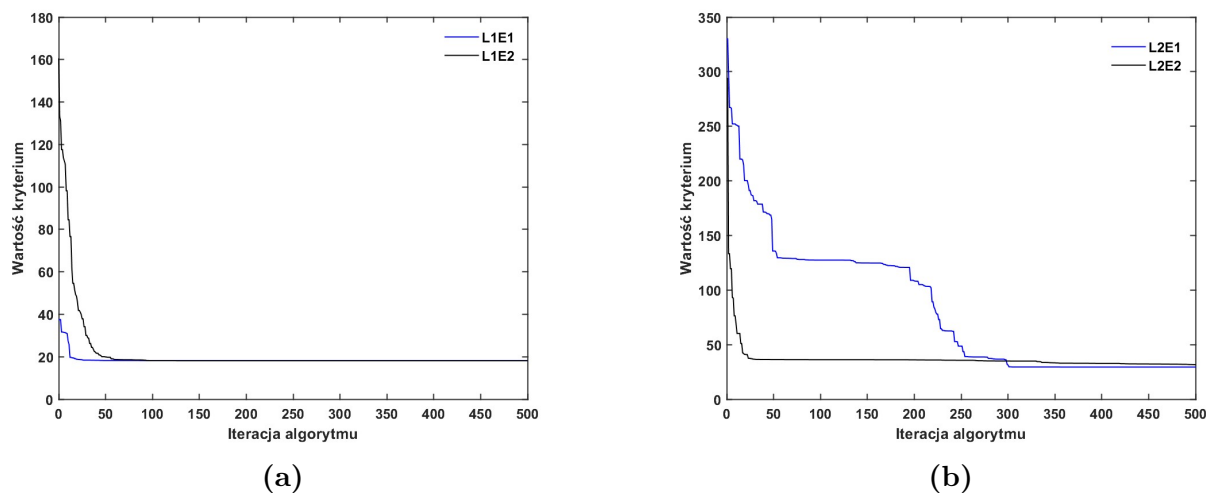
W badaniach założono dwa warianty dotyczące funkcji celu, przyjmowane w optymalizacji wykorzystując odpowiednio sumę absolutną różnic (3.9) oraz pierwiastek średniokwadratowy (3.10). Dla każdej z funkcji celu przeprowadzono badania porównawcze celem oszacowania najlepszego zestawu parametrów charakteryzujących modele.

$$f_{L_1}(x) = \sum_{i=1}^N |I_{msr,i} - I_{model,i}| \quad (3.9)$$

$$f_{L_2}(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_{msr,i} - I_{model,i})^2} \quad (3.10)$$

Sześć modeli matematycznych zostało przetestowane dla pięciu różnych taśm HTS, opisanych w poprzednim rozdziale, poprzez wyznaczenie najlepszego dopasowania modeli do funkcji. Dla każdego z modeli przeprowadzono analizę wielowariantową, Cztery warianty uwzględniając zmienność współczynników anizotropii (3.7), (3.8) oraz funkcji celu (3.9),

(3.10). Łącznie przeprowadzono 120 procesów optymalizacji. Pozwoliło to na wybór najlepszego uogólnionego modelu analitycznego, mającego zastosowanie dla taśm HTS 2G. Na Rys. 3.18 zaprezentowano zbieżność algorytmu w przypadku badań taśmy ASMC dla modelu MAA.



Rysunek 3.18. Pierwsze 500 kroków iteracji dopasowania pomiarów do modelu MAA: a) dla współczynnika Blattera ϵ_1 , b) dla współczynnika Blattera ϵ_2 .

Przedstawione powyżej charakterystyki zbieżności funkcji dla pierwszych 500 iteracji algorytmu nietoperzy wskazują poprawność działania algorytmu. W całym procesie przyjęto, że liczba iteracji wynosi 1000, co zapewniło pewność właściwego doboru parametrów. Po przetestowaniu poprawności działania algorytmów dokonano poszukiwania parametrów dla wszystkich modeli z zachowaniem przedstawionej metodologii.

Wyniki analizy dla taśmy ASMC zaprezentowano w Tabeli 3.2.

W Tabeli 3.2 zestawiono wyniki przeprowadzonej analizy w postaci wartości parametrów poszczególnych modeli. Zaobserwowano znaczny rozrzut wartości parametrów. W zależności od funkcji celu minimalny błąd wynosił odpowiednio: 18,12 A dla MAA oraz 44,33 A dla KTH.

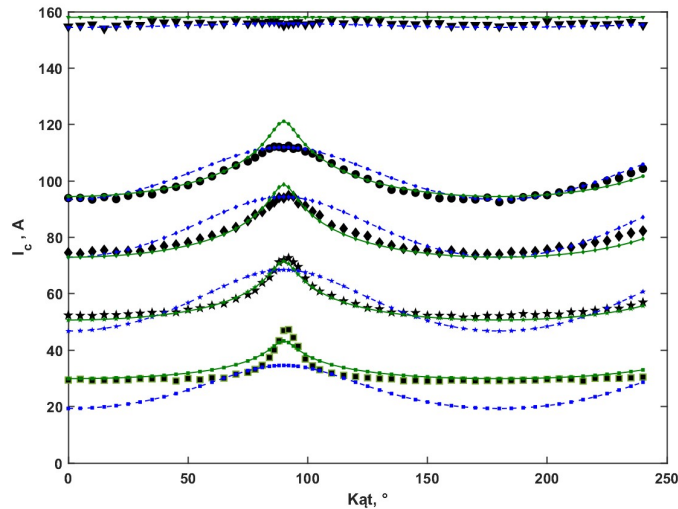
Dopasowanie realizowane było dla wszystkich wartości pola jednocześnie, co mogło powodować powstawanie stosunkowo dużych wartości błędów. Na podstawie przeprowadzonej analizy dokonano wyboru najlepszego modelu i zestawu parametrów dającego najlepsze rezultaty celem porównania ich z wynikami pomiarów.

Porównanie wyników modeli numerycznych dla najlepszego zestawu parametrów modelu przedstawiono na Rys. 3.19. Kolorem czarnym zaznaczone zostały wartości zmierzone, kolorem niebieskim wyniki symulacji dla funkcji celu (3.9), a kolorem zielonym dla funkcji celu (3.10). Można zauważyć, że lepsze dopasowanie funkcji otrzymuje się dla parametrów z modeli (3.9).

Wybór odpowiedniego modelu numerycznego przy analizie powinien być podyktowany potencjalnym wykorzystaniem taśmy oraz określonym punktem pracy. Bazując na tych informacjach można dobrać najlepszy model. Przykładowo, dane uzyskane z wykorzystaniem modelu (3.10) cechują się rozbieżnością głównie w okolicach równoległego ustawienia taśmy względem linii sił pola magnetycznego. Z kolei model (3.10) nadaje się głównie do odwzorowania wpływu pola magnetycznego dla niskich wartości, w okolicach pola własnego.

Tabela 3.2. Porównanie wyników doboru i parametrów do modeli I_c dla taśmy ASMC.

MODEL	PARAMETRY MODELU					Błąd	$F(x)$	$\epsilon(\theta)$
	B_{c0}	k	b	l	α			
Kim-like (KL)	1,03	0,65	3,04			18,97	L_1	ϵ_1
	2,28	2,46	1,92	3,91		19,06	L_1	ϵ_2
	0,41	0,69	1,42			36,60	L_2	ϵ_1
	1,08	1,85	1,40	2,69		36,58	L_2	ϵ_2
Magneto-angular anisotropy (MAA)	0,80	0,64	2,58		1,07	18,19	L_1	ϵ_1
	3,28	3,19	2,41	5,05	1,08	18,12	L_1	ϵ_2
	0,10	0,32	0,27		2,70	27,81	L_2	ϵ_1
	0,23	2,92	0,29	7,95	2,55	27,65	L_2	ϵ_2
Percolation (PER)	0,41	0,86	2,53		0,87	21,85	L_1	ϵ_1
	1,10	1,26	2,07	1,52	0,87	21,69	L_1	ϵ_2
	0,43	1,62	-0,54		0,81	48,28	L_2	ϵ_1
	1,43	1,53	1,49	1,95	0,81	47,85	L_2	ϵ_2
Kim-tanh (KTH)	0,11	0,71	1,00		0,74	19,88	L_1	ϵ_1
	1,07	2,97	1,27	3,90	0,76	20,31	L_1	ϵ_2
	0,11	1,28	-1,02		0,72	44,33	L_2	ϵ_1
	0,18	0,53	0,15	6,85	0,80	23,15	L_2	ϵ_2
Kim-cosh (KCH)	0,16	0,91	2,59		0,56	19,96	L_1	ϵ_1
	1,84	1,84	1,86	2,10	0,57	19,79	L_1	ϵ_2
	0,15	1,19	-0,89		0,47	44,16	L_2	ϵ_1
	1,77	1,49	2,77	1,58	0,54	40,94	L_2	ϵ_2
Kim-cosh-power (KCP)	0,30	1,73	-0,05		8,83	168,43	L_1	ϵ_1
	0,71	1,66	1,14	2,09	-0,09	21,11	L_1	ϵ_2
	0,16	5,23	-0,08		-0,08	59,41	L_2	ϵ_1
	1,83	4,89	0,67	7,74	-0,17	46,26	L_2	ϵ_2

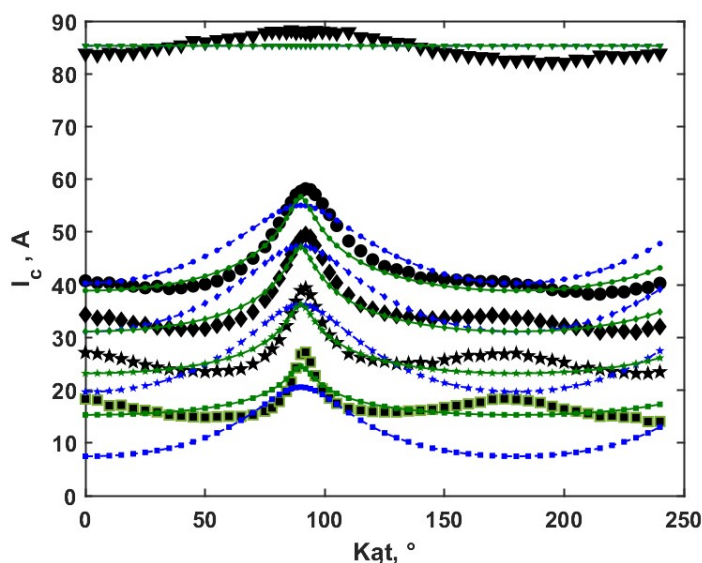


Rysunek 3.19. Porównanie wyników pomiarów z modelami matematycznymi anizotropii dla taśmy AMSC, kolor niebieski dla funkcji celu (3.9), kolor zielony dla funkcji celu (3.10).

Kolejną badaną taśmą była taśma SuperPower. Wybór tej taśmy wynikał z jej dostępności na potrzeby przeprowadzenia badań laboratoryjnych i możliwości porównania z modelem. Analizowana taśma to taśma SCS4050-AP, w której wprowadzono modyfikacje struktury wewnętrznej celem poprawy właściwości. Analogicznie jak w przypadku taśmy AMSC, wyniki optymalizacji przedstawiono w postaci tabelarycznej oraz w postaci graficznej. W Tabeli 3.3 zestawiono wyniki optymalizacji oraz odpowiednio kolorami niebieskim i zielonym zaznaczono najlepszy model oraz jego parametry.

Tabela 3.3. Porównanie wyników optymalizacji i parametrów modeli I_c dla taśmy SuperPower.

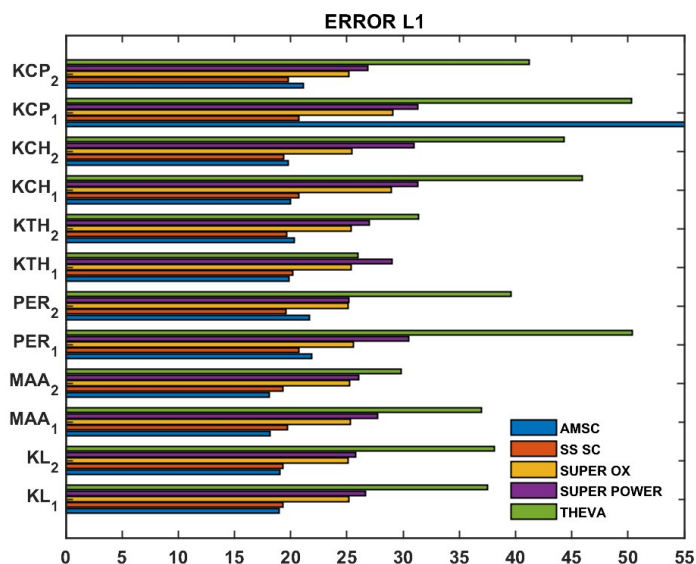
MODEL	PARAMETRY MODELU					Błąd	$F(x)$	ϵ
	B_{c0}	k	b	l	α			
Kim-like (KL)	0,25	0,48	1,34			26,67	L_1	ϵ_1
	0,57	1,49	1,06	3,32		25,77	L_1	ϵ_2
	0,08	0,47	0,64			44,92	L_2	ϵ_1
	0,46	2,84	0,64	6,13		44,89	L_2	ϵ_2
Magneto-angular anisotropy (MAA)	1,55	0,54	4,36		0,79	27,77	L_1	ϵ_1
	1,66	3,52	1,20	7,61	0,97	26,08	L_1	ϵ_2
	0,90	-0,62	3,01		0,86	49,38	L_2	ϵ_1
	0,06	0,50	0,24	2,72	2,06	33,07	L_2	ϵ_2
Percolation (PER)	0,27	0,74	1,83		0,72	30,48	L_1	ϵ_1
	1,12	2,60	0,45	8,52	0,73	25,21	L_1	ϵ_2
	0,31	0,84	2,22		0,74	53,65	L_2	ϵ_1
Kim-tanh (KTH)	0,58	0,96	0,38	2,83	0,66	41,44	L_2	ϵ_2
	0,07	0,68	1,38		0,72	29,00	L_1	ϵ_1
	0,94	4,09	0,85	7,36	0,56	27,03	L_1	ϵ_2
	0,04	1,15	-2,44		0,48	56,53	L_2	ϵ_1
Kim-cosh (KCH)	0,11	0,44	0,18	6,28	0,62	26,93	L_2	ϵ_2
	0,09	0,84	2,00		0,45	31,30	L_1	ϵ_1
	0,92	1,58	1,63	1,96	0,47	30,97	L_1	ϵ_2
	0,07	1,19	-1,26		0,34	57,99	L_2	ϵ_1
Kim-cosh-power (KCP)	0,27	2,34	0,20	8,81	0,42	38,00	L_2	ϵ_2
	0,09	0,84	1,73		-0,14	31,30	L_1	ϵ_1
	0,56	2,83	0,45	6,48	-0,19	26,89	L_1	ϵ_2
	0,10	0,92	2,66		-0,14	54,71	L_2	ϵ_1
	0,35	3,40	0,25	9,74	-0,22	43,74	L_2	ϵ_2


Rysunek 3.20. Porównanie wyników pomiarów z modeli matematycznymi anizotropii taśm SuperPower, kolor niebieski dla funkcji celu (3.9), kolor zielony dla funkcji celu (3.10).

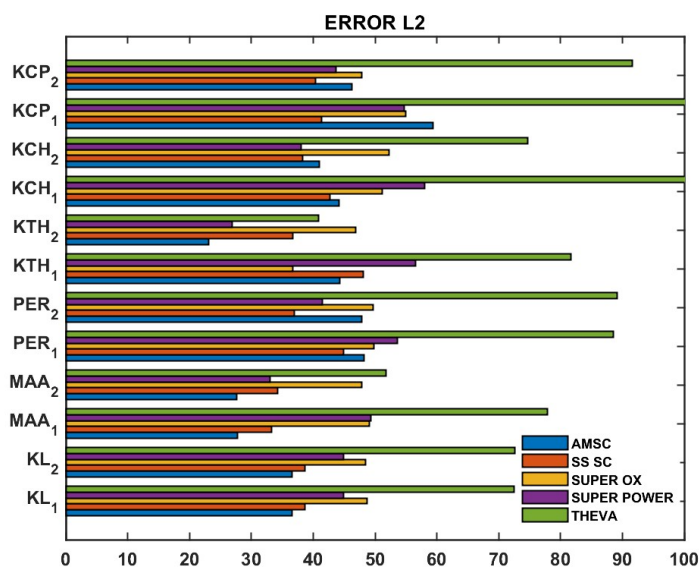
Należy zauważyć iż sposób zaprezentowanych modeli (**KTH**), będący autorską modyfikacją modelu Kima okazał się najlepszy dla kryterium (3.10). Ponadto model ten charakteryzował się bardzo dobrym dopasowaniem parametrów, czego nie można powiedzieć o dopasowaniu modelu perkolacyjnego dla pełnego zakresu kąta θ . W przypadku taśm z pinningiem widoczne jest, iż modele nie przewidują drugiego lokalnego ekstremum, czego przykładem może być dopasowanie funkcji dla zakresu $(140 - 210)^\circ$. Ponadto, widoczna jest rozbieżność dla modeli przy polu własnym, co może wynikać z założenia stałej wartości I_c w polu własnym.

Wyniki dopasowania modeli numerycznych dla trzech pozostałych taśm zamieszczono

w załączniku (Dodatek B.1.1). Celem porównania przebadanych modeli wyniki zamieszczono na Rys. (3.21) i Rys. (3.22). Zestawienie obejmuje wartości minimum funkcji celu (3.9) oraz (3.10). Na Rys. 3.21 zaprezentowano porównawcze zestawienie dla przypadku (3.9). Przetestowane modele numeryczne w najlepszy sposób odwzorowują anizotropie w taśmach ASMC oraz Shanghai Superconductor. Dla tych modeli zanotowano najmniejsze wartości funkcji celu. Wadą wszystkich modeli numerycznych jest fakt, iż w przypadku niestandardowej anizotropii, takiej jak występuje w taśmach THEVA, czy SuperPower nie odwzorowują one wszystkich charakterystyk poprawnie.



Rysunek 3.21. Porównanie zbieżności modeli dla funkcji celu(3.9) dla taśm ASMC, Shanghai Superconductor, SuperOx, SuperPowe, Theva.



Rysunek 3.22. Porównanie zbieżności modeli dla funkcji celu (3.10) dla taśm ASMC, Shanghai Superconductor, SuperOx, SuperPowe, Theva.

Na Rys. 3.22 zaprezentowano zestawienie wyników dla funkcji celu (3.10). Podobnie jak w przypadku (3.9) właściwy wybór modelu do analizy określonej taśmy jest istotny. Otrzymane w (3.10) wartości są większe, niż wartości uzyskane przy analizie (3.9) i w większości przypadków mieszczą się w zakresie 25 – 30. Podobnie jak w poprzedniej funkcji celu najbardziej zbieżną wartość z wynikami pomiarowymi jest metoda KL. Z uwagi na przesunięcie wartości maksymalnej prądu krytycznego w taśmach THEVA (Rys. 3.15), jej porównanie z modelami numerycznymi wychodzi najgorzej, gdyż testowane modele nie zakładały takiej funkcji. W odniesieniu do przeprowadzonej analizy porównawczej z wykorzystaniem algorytmu nietoperzy można stwierdzić, że dla funkcji opisanej zależnością (3.10) wartości błędów są znacznie wyższe niż w przypadku (3.9). Dodatkowo należy zauważyć, że wykorzystanie algorytmu nietoperzy stanowi alternatywę do powszechnie używanego algorytmu Nelder-Mead.

3.5. Podsumowanie rozdziału

W rozdziale zaprezentowano analizę zależności kątowej prądów krytycznych w taśmach HTS oraz porównawczą analizą modeli opisujących zjawisko anizotropii taśm. Analiza zależności kątowej prądów krytycznych jest zagadnieniem złożonym, wymagającym odpowiedniego aparatu matematycznego. Przeprowadzona analiza wskazuje, że nie ma jednego uniwersalnego modelu opisującego wszystkie rodzaje taśm. Niezbędna jest zatem indywidualna charakteryzacja każdego produktów. Na podstawie zestawionych danych oraz charakterystyk kątowych można stwierdzić, iż dla zależności odbiegających od standardowych opisów eliptycznych lepsze są modele hiperboliczne.

4

Metoda bezparametryczna

W rozdziale zaprezentowano metodę wyznaczania modeli numerycznych gęstości prądów krytycznych J_c z danych pomiarowych, określaną jako metoda bezparametryczna MBP. Metoda zdefiniowana jako narzędzie wspierające projektantów w celu odtworzenia gęstości prądu krytycznego na podstawie danych pomiarowych z uwzględnieniem wpływu pola własnego.

Metodę opracowano przy współpracy z Instytutem Fizyki Technicznej Karlsruhe Institute of Technology. W ramach współpracy powstała publikacja opisującą zasadę działania i możliwości aplikacyjne metody;

Zermeno, V. M., Habelok, K., Stępień, M., Grilli, F. *A parameter-free method to extract the superconductor's $J_c(\mathbf{B}, \theta)$ field-dependence from in-field current-voltage characteristics of high temperature superconductor tapes* [16].

Strukturę rozdziałów podzielono na pięć podrozdziałów. Na wstępie (Rozdział 4.1) przedstawiono problematykę odwzorowania zależności kątowej gęstości prądów definiując obszar w którym metoda jest używana. W dalszej części dokonano opisu algorytmu działania metody oraz przedstawiono możliwości aplikacji w analizach 1D oraz 2D (Rozdział 4.2). W dalszej części zaprezentowano działanie metody dla wybranych taśm HTS, opisanych w (Rozdziale 3.4). Modele gęstości prądu $J_c(\mathbf{B}, \theta)$ zostały zaprezentowane w podrozdziale (Rozdział 4.3). W dalszej części rozdziału zaprezentowano przykłady badań, w których metoda została wykorzystana (Rozdział 4.4). Na koniec rozdziału zamieszczono krótkie podsumowanie (Rozdział 4.5).

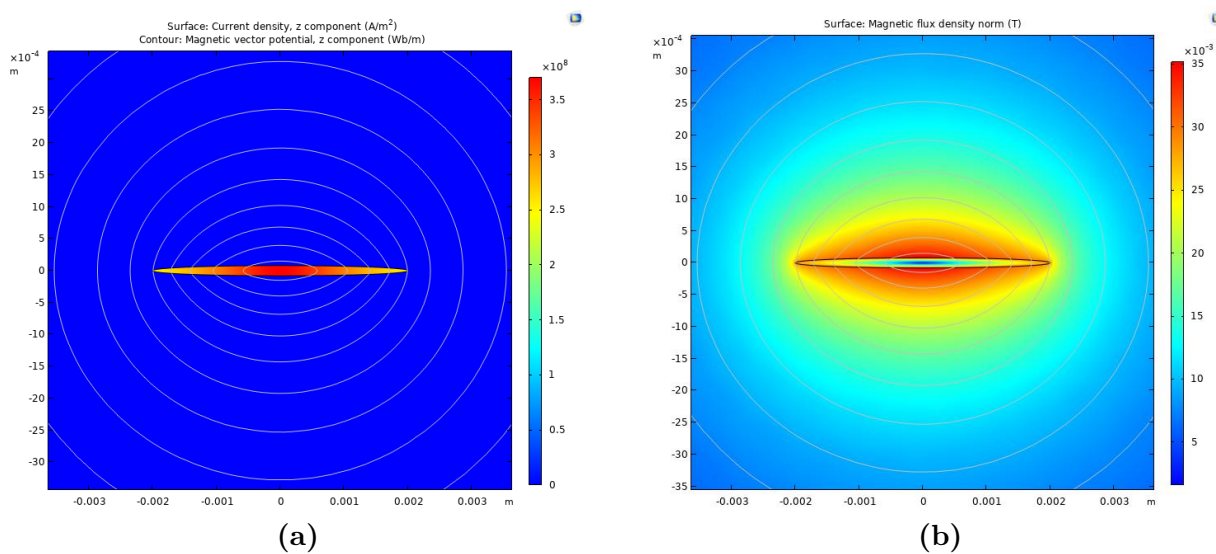
4.1. Wprowadzenie

Estymacja prądów krytycznych I_c lub wyznaczanie strat zmiennoprądowych AC w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych HTS poprzez symulacje komputerowe wymaga znajomości zależności krytycznej gęstości prądu w materiale nadprzewodnikowym.

Zależność pomiędzy wartością pola magnetycznego H , orientacją nadprzewodnika względem linii sił pola magnetycznego oraz temperatury wpływa na określenie punktu pracy urządzenia, co zostało szczegółowo opisane we wcześniejszych rozdziałach.

Metody charakteryzacji taśm HTS bazują na pomiarze wielkości skalarnych, jakimi są wartości prądu I , temperatury T czy indukcji B , dostarczając informacji makroskopowych na temat dla konkretnej próbki. Wielkości te wykorzystywane są do określania parametrów niedostępnych pomiarowo lub dostępnych tylko drogą symulacyjną. Jedną z takich wielkości jest gęstość prądu krytycznego J_c w taśmie HTS. Jest to istotne, bo w przekroju poprzecznym taśmy gęstość prądu przyjmuje różne wartości. Na Rys. 4.1a zaprezentowano symulację rozkładu gęstości prądu w taśmie 1G, przewodzącej prąd o natężeniu 161 A. Na Rys. 4.1b zaprezentowano rozkład pola magnetycznego w tej taśmie.

Opisane w poprzednim rozdziale przykłady wykorzystania modeli analitycznych do estymacji wartości prądu krytycznego w taśmach HTS oraz krytycznych gęstości prądów wymagają do poprawnego działania porównania z danymi empirycznymi. Dodatkowo nie występuje jeden, uniwersalny model nadający się do wszystkich taśm, a do odpowiedniego dostrojenia modelu konieczna jest ingerencja w parametry dopasowujące.

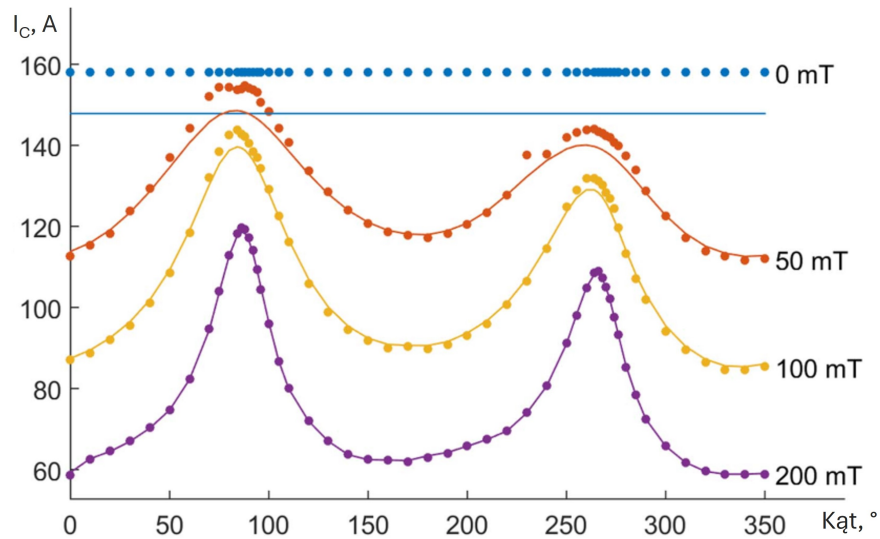


Rysunek 4.1. Wyniki symulacji numerycznej w programie COMSOL; a) rozkład gęstości prądu w taśmie HTS, b) rozkład indukcji magnetycznej[144].

Wyznaczenia gęstości prądu w taśmie HTS można dokonać w oparciu o model numeryczny gęstości prądów krytycznych. Jednym z najbardziej popularnych jest "Kim model". Niemniej jednak dla aplikacji elektroenergetycznych, w których taśmy HTS pracują w niskich polach własnych model ten niedostatecznie dobrze odzwierciedla właściwości taśmy. Przykład braku dopasowania modeli numerycznych do wyników prądów krytycznych przedstawiono na Rys. 4.2.

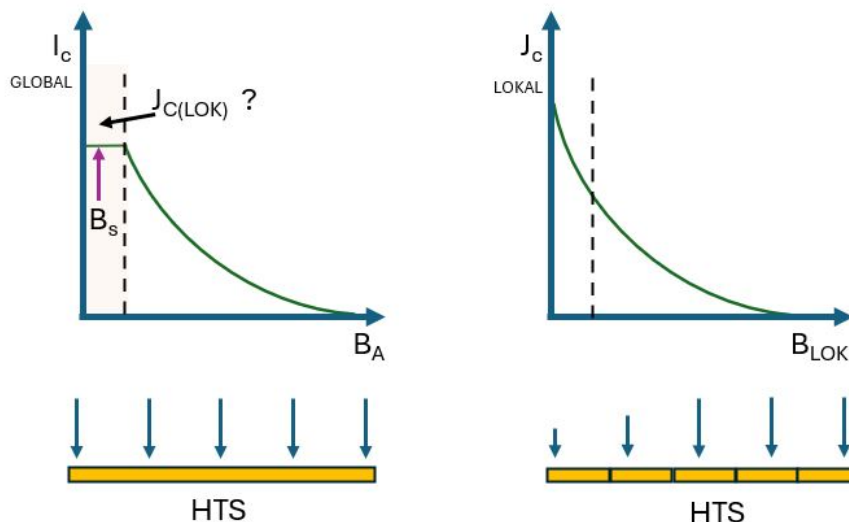
Przedstawione na tym rysunku charakterystyki wskazują, iż wartości prądów krytycznych otrzymane pomiarowo odbiegają od wyników otrzymanych z wykorzystaniem modeli

numerycznych (w tym przypadku wykorzystano model opisany równaniem (2.27)). Największa rozbieżność występuje w przypadku niskich wartości pól zewnętrznych dla taśmy ustawionej równolegle do linii sił pola magnetycznego. Jest to związane z wpływem pola własnego wynikającego z przepływu prądu transportu, który z uwagi na zwrot przeciwny do pola zewnętrznego niweluje jego wpływ, przez co nadprzewodnik charakteryzuje się większą wartością prądu krytycznego [140].



Rysunek 4.2. Zależność kątowna $I_c(B, \theta)$ obliczona przy użyciu $J_c(B_{lok}, \theta)$. Punkty ciągłe: dane eksperymentalne, linią oznaczono dane z modelu Kima dla taśmy BiSCCO [16].

Z uwagi na fakt, iż gęstość prądu krytycznego w taśmach HTS nie jest wielkością stałą i zależy dodatkowo od lokalnej wartości indukcji magnetycznej B_{lok} oraz kąta θ linii sił pola względem powierzchni taśmy, konieczne jest uwzględnienie wpływu tych parametrów na rzeczywisty prąd krytyczny taśmy HTS.



Rysunek 4.3. Graficzna interpretacja zmian prądu krytycznego w taśmach HTS.

Większość modeli numerycznych wymaga dostarczenia informacji o wartości gęstości prądu krytycznego z uwzględnieniem lokalnej wartości indukcji magnetycznej $J_c(B_{lok}, \theta)$.

Niemniej jednak wykorzystując wartości prądów krytycznych, które są danymi pomiarowymi uwzględnia się całościowo zależność $I_c(B_A, \theta)$. Wykorzystanie prostego przekształcenia bazującego na ilorazie wartości prądu przez powierzchnie (4.1) nadprzewodnika stanowi tylko przybliżenie wartości rzeczywistych, a jego stosowanie jest poprawne dla silniejszych pól magnetycznych (powyżej 500mT).

$$J_c(B_{\text{lok}}, \theta) = \frac{I_c(B_A, \theta)}{A} \quad (4.1)$$

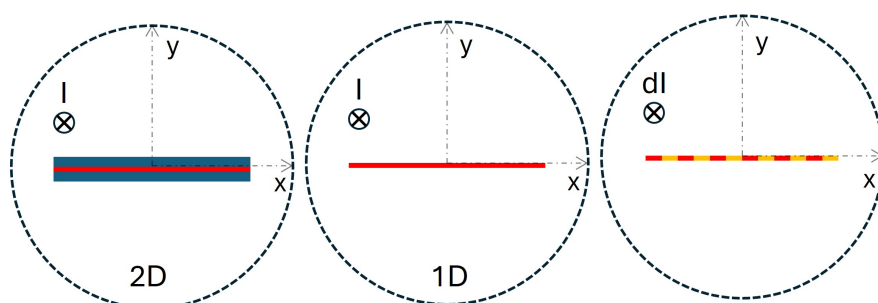
Graficzną interpretację sposobu wyznaczenia prądu krytycznego przy niskich wartościach pola magnetycznego przedstawiono na Rys. 4.3. Grafika po lewej przedstawia obszar, w którym oddziaływanie pola własnego wpływa na wartość prądu krytycznego. Po prawej stronie zilustrowano zwiększoną wartość prądów krytycznych w odniesieniu do modeli, związaną z redukcją oddziaływania pola zewnętrznego poprzez pole własne. Oddziaływanie pola własnego jest na poziomie 10-20 mT.

Istotnym wyzwaniem badawczym było opracowanie modelu, który nie wymaga wykorzystywania parametrów opisujących zależności materiałowe oraz ich korekty. Model powinien umożliwiać odtworzenie gęstości prądu krytycznego z danych pomiarowych. Motywacją do opracowania metody bezparametrycznej była potrzeba znalezienia narzędzia, które nie wymaga wiedzy o modelach, ich parametrach, wzajemnych relacjach oraz wiedzy o metodach optymalizacji stosowanych do estymacji parametrów, a dodatkowo cechującego się dobrym stosunkiem szybkości działania do dokładności.

W badaniach w szczególności skupiono się na wpływie pola magnetycznego, jednorodnego, o zmiennym kierunku względem taśmy HTS o wartościach do 500 mT, przy których zauważalny jest wpływ prądów ekranujących.

4.2. Istota metody bezparametrycznej

Podstawą do opracowania metody bezparametrycznej jest analiza nieskończenie długiej taśmy HTS przewodzącej prąd. W zależności od przyjętego poziomu skomplikowania analizy dokonuje się wyboru typu reprezentacji. Taśmę HTS w metodzie bezparametrycznej zamodelowano najpierw w postaci 1D oraz dokonano dyskretyzacji szerokości taśmy, zgodnie z Rys. 4.4c. Wyznaczono prąd płynący przez każdy z utworzonych obszarów dyskretnych, zgodnie z zależnością $dI = \frac{I}{2a} dx$; gdzie $2a = 4\text{mm}$, co odpowiada szerokości taśmy. Przepływ prądu o stałej wartości odpowiada za wytworzenie pola magnetycznego własnego, które można wyznaczyć z zależności (4.2).



Rysunek 4.4. Reprezentacja taśmy HTS do analizy: a) 2D łącznie z poszczególnymi warstwami, b) 1D jako sam nadprzewodnik, zdyskretyzowane 1D do badania w punktach na osi OX.

Model 1D został zbudowany w programie Matlab, (kod źródłowy zamieszczono w dodatku (Dodatek D.1)). Kod się na dwie zasadnicze części. Pierwsza odpowiada za zbudowanie geometrii nadprzewodnika, a druga za wyznaczenie wartości prądu krytycznego w taśmie oraz wartości składowych indukcji magnetycznej. Zadanie obliczeniowe sprowadza się do numerycznego rozwiązania równań ((4.4), (4.5) , (2.27)). Taśma nadprzewodnikowa została podzielona na 100 elementów, dla każdego wartość prądu wynosi (4.2).

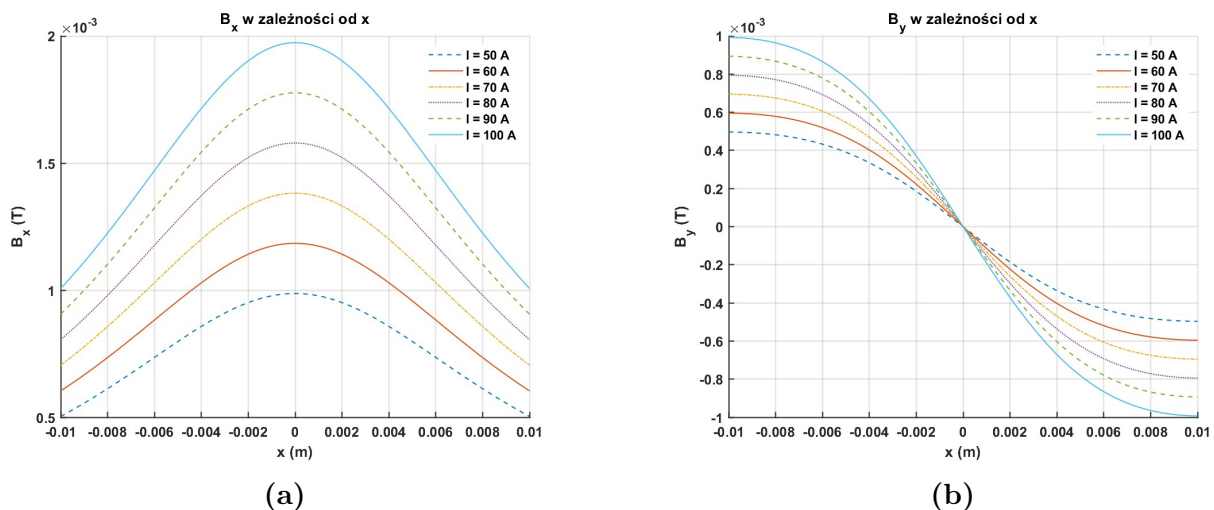
$$dI = \frac{I}{2a} dx \quad (4.2)$$

Z uwagi na zmianę kierunku wektora dB wyznaczono składowe w osi OX oraz składowe w osi OY (4.3). Z uwagi na prostą geometrię taśmy składowe te można wyznaczyć z równań (4.4) oraz (4.5), które są funkcją prądu. Na Rys. 4.5 przedstawiono parametryczną analizę zmiany komponentów indukcji magnetycznej dla różnych wartości prądu stałego (w zakresie 50-100 A).

$$\begin{cases} dB_x = dB \sin \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi a r^2} y dx' \\ dB_y = dB \cos \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi a r^2} (x' - x) dx' \end{cases} \quad (4.3)$$

$$B_x = \int_{x'=-a}^a dB_x = \int_{-a}^a \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \frac{y}{(x' - x)^2 + y^2} dx' = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left(\tan^{-1} \left(\frac{a - x}{y} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{a + x}{y} \right) \right) \quad (4.4)$$

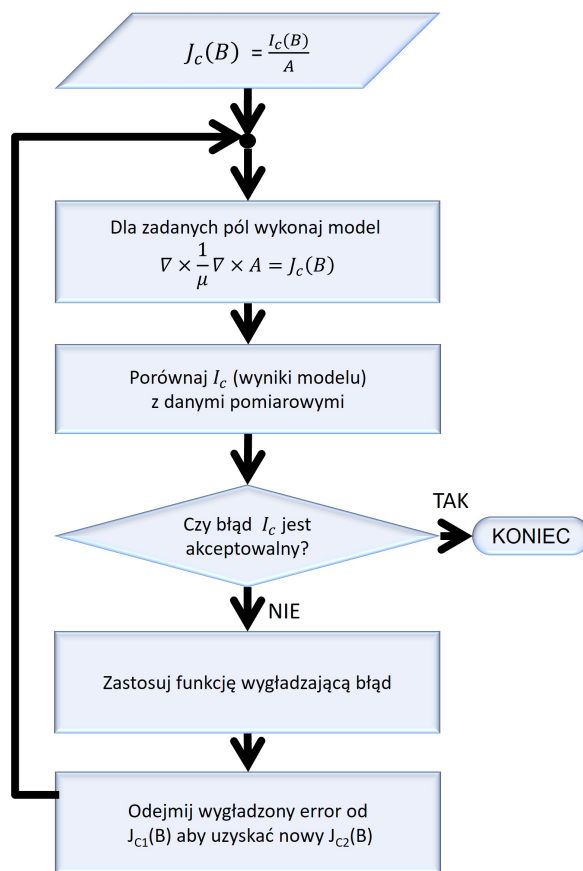
$$B_y = \int_{x'=-a}^a dB_y = \int_{-a}^a \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \frac{x' - x}{(x' - x)^2 + y^2} dx' = \frac{\mu_0 I}{8\pi a} \ln \frac{(x - a)^2 + y^2}{(x + a)^2 + y^2} \quad (4.5)$$



Rysunek 4.5. Wyniki symulacji numerycznej przedstawiające zmianę komponentów indukcji magnetycznej a) B_x , b) B_y dla zmiany natężenia prądu.

Opracowana metoda bezparametryczna MBP opiera się na porównaniu danych pomiarowych w modelem gęstości prądu krytycznego i iteracyjnej zmianie wartości, powodującej dopasowanie się modelu do danych pomiarowych. Schemat blokowy

przedstawiony Na Rys. 4.6 ilustruje wszystkie kroki procedury bezparametrycznej MBP, która jest wykorzystywana do ekstrakcji zależności $J_c(B_{lok}, \theta)$.

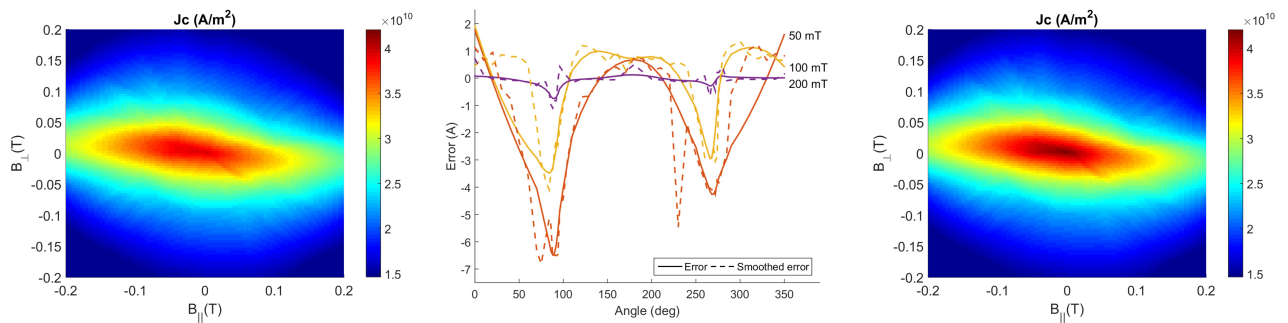


Rysunek 4.6. Algorytm działania metody bezparametrycznej MBP.

Analizę rozpoczyna się od przygotowania danych dotyczących zależności kątowej prądów krytycznych, które są funkcją wartości indukcji magnetycznej B oraz kąta obrotu θ taśmy HTS względem linii pola magnetycznego. Dane przygotowane są w postaci trójkolumnowej. Po przygotowaniu danych pomiarowych realizowane są następujące kroki:

- Dane eksperymentalne podzielone przez przekrój poprzeczny nadprzewodnika traktuje się jako początkową wartość $J_c(B_{lok}, \theta)$;
- Wyznaczenie wartości modelu dla wszystkich wartości przyłożonego pola magnetycznego i kącie θ , które są następnie porównywane z wartościami zmierzonymi eksperymentalnie;
- Porównanie różnicy pomiędzy wartością zmierzoną a obliczoną. Błąd między obliczonym a zmierzonym prądem krytycznym jest wyznaczany, a następnie wygładzany tak, aby wykluczyć wartości odstające, które mogą być spowodowane błędem pomiarowym oraz aby uniknąć niewłaściwego dopasowania;
- Wygładzony błąd jest dzielony przez przekrój poprzeczny nadprzewodnika i odejmowany do bieżącej wartości funkcji interpolującej $J_c(B_{lok}, \theta)$, zapewniając w ten sposób nowe oszacowanie $J_c(B_{lok}, \theta)$. W programie MATLAB można to osiągnąć za pomocą funkcji `scatteredInterpolant`; item Procedura jest powtarzana do momentu, kiedy błąd między prądami wyznaczonymi i zmierzonymi eksperymentalnie jest wystarczająco mały.

Ważnym krokiem w tej procedurze jest wygładzanie błędu, które jest zilustrowane na Rys. 4.7. Przedstawiono, jak zmienia się $J_c(B_{lok}, \theta)$ od pierwszej iteracji procesu do drugiej i jak błąd jest wygładzany w danej iteracji. Po pierwszej iteracji rozkład $J_c(B_{lok}, \theta)$ staje się bardziej szczytowy, co widać po ciemniejszym obszarze pojawiającym się w centrum. Dzieje się tak, ponieważ uwzględniony jest wkład pola własnego, przez co gęstości prądów krytycznych są większe. Nie zachodzą znaczące zmiany w regionach daleko od centrum, odpowiadające większym amplitudom pola, gdzie pole własne jest pomijalne.



Rysunek 4.7. Graficzna reprezentacja iteracyjnego procesu realizowanego w MBP.

Zaletą tego podejścia jest fakt, że nie są potrzebne żadne formuły dla $J_c(B_{lok}, \theta)$. W procedurze wykorzystywane są wyłącznie dane pomiarowe, które są modyfikowane iteracyjne tak, aby uwzględnić wpływ pola własnego.

Błąd jest następnie wygładzany za pomocą funkcji "smooth" wykorzystywanej w pakiecie w Matlab, z opcją *roless*, która przypisuje niższą wagę wartościom odstającym w regresji. Metoda przypisuje zerową wagę danym, które znajdują się poza sześcioma średnimi odchyleniami absolutnymi. Funkcja ta wygładza dane, używając lokalnej regresji z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów oraz modelu wielomianowego drugiego stopnia. Już po zaledwie jednej iteracji rozkład $J_c(B_{lok}, \theta)$ przyjmuje większe wartości, co widać po ciemniejszym obszarze. Dzieje się tak, ponieważ odjęto wkład pola własnego od pola zewnętrznego. W regionach daleko od centrum, odpowiadających większym amplitudom pola, gdzie pole własne jest pomijalne, nie zachodzą znaczące zmiany.

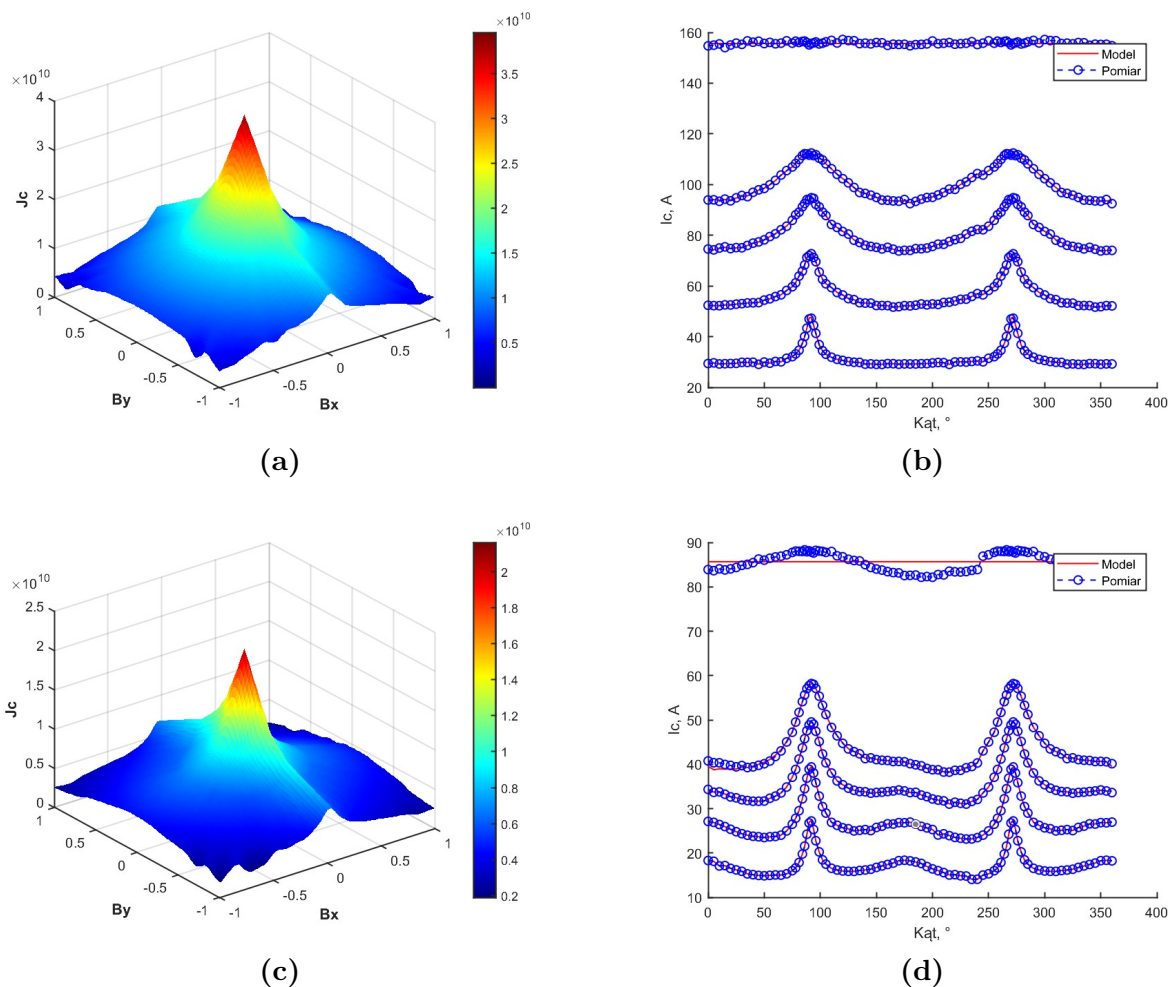
Drugą formą metody bezparametrycznej MBP jest metoda 2D, integrująca środowisko Matlab i Comsol Multiphysics, co zostało szczegółowo opisane w publikacji [16]. W metodzie 2D wykorzystano równania różniczkowe cząstkowe do opisu i modelowania zjawiska zachodzącego w taśmach. Z uwagi na brak wykorzystania oprogramowania Comsol Multiphysics w dalszych badaniach metoda ta nie została przedstawiona szczegółowo w niniejszej pracy.

4.3. Zastosowanie MBP w analizach 1D

Podobnie do analizy przeprowadzonej w Rozdziale 3.4 dotyczącej wykorzystania modeli analitycznych prądów krytycznych metoda MBP została przetestowana celem pokazania jej funkcjonalności. Z uwagi na fakt, iż model MBP wymaga informacji pomiarowych w zakresie kątów $0^\circ - 360^\circ$, wprowadzona została sztuczna symetryzacja danych pomiarowych. Przyjęto na potrzeby porównania modeli pełną symetrię, przez co wyniki prądów krytycznych dla stopni $240^\circ - 360^\circ$ zostały opracowane poprzez wykorzystanie zakresu $60^\circ - 180^\circ$.

MBP wykorzystano do opracowania modeli gęstości prądu krytycznego w taśmach AMSC, oraz SuperPower. Wyniki przedstawiające modele gęstości prądu krytycznego $I_c(B, \theta)$ oraz porównanie wyników pomiarowych z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem MBP przedstawiono na Rys. 4.8. Porównując modele gęstości prądów krytycznych (Rys. 4.8a i Rys. 4.8c) widoczna jest ponad 1,5-krotna różnica w wartości na korzyść taśm AMSC.

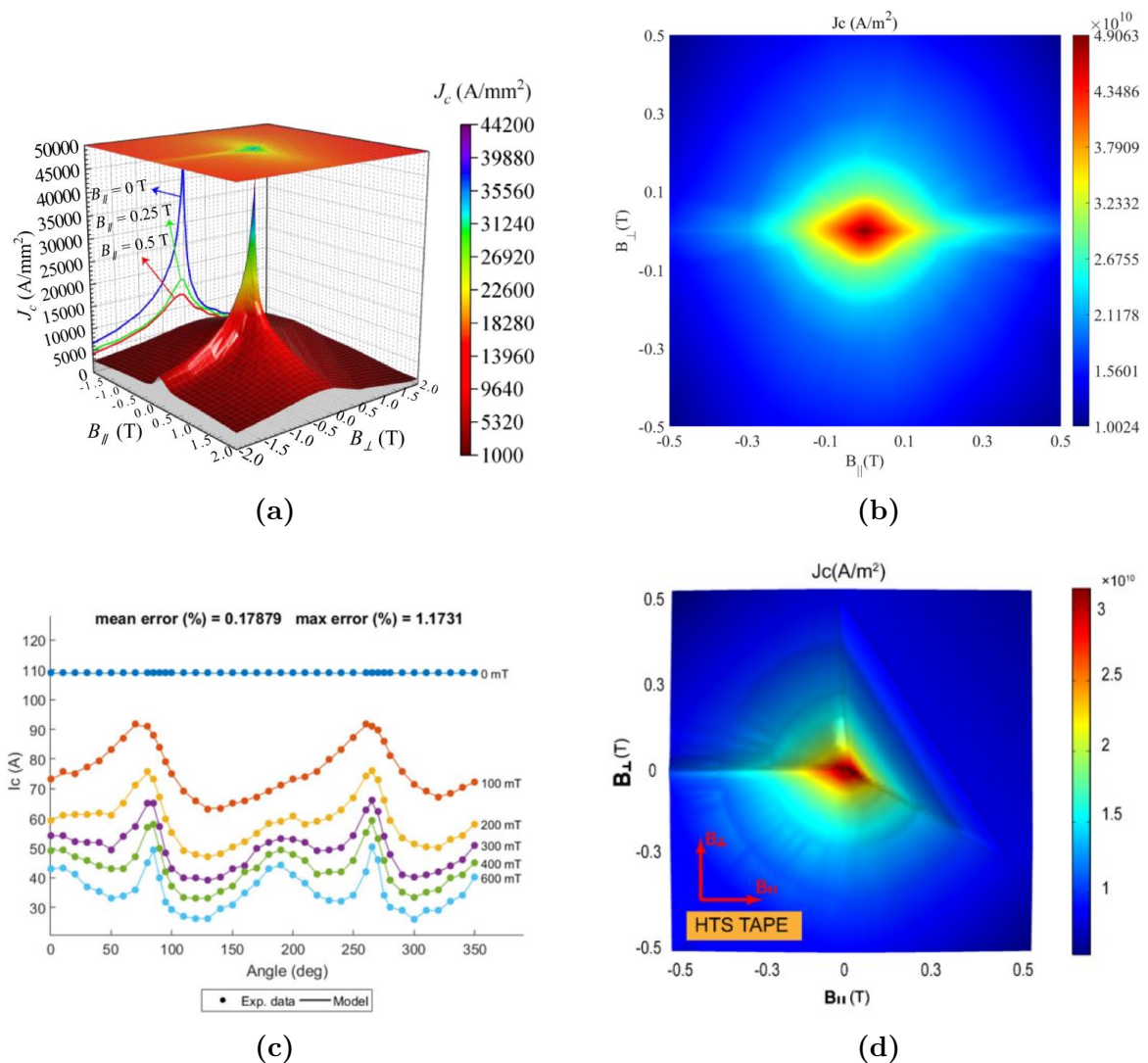
Na Rys. 4.8b i Rys. 4.8d zaprezentowano odwzorowanie modeli z danych pomiarowych. Istotną zaletą MBP jest uzyskanie procentowego błędzi średniokwadratowego na poziomie 0,13 % dla taśm AMSC oraz 0,54 % dla taśm SuperPower w czasie mniejszym niż 10 s, co niewątpliwie jest zaletą tej metody.



Rysunek 4.8. (a) Model $J_c(B, \theta)$ dla taśmy ASMC (b) porównanie danych pomiarowych z wynikami metody MBP 1D dla taśmy ASMC, (c) Model $J_c(B, \theta)$ dla taśmy SuperPower (d) porównanie danych pomiarowych z wynikami metody MBP 1D dla taśmy SuperPower.

4.4. Zastosowanie MBP w analizach 2D

Metoda MBP została opracowana jako narzędzie wspomagające naukowców, zajmujących się modelowaniem numerycznym nadprzewodników, będącym łącznikiem między danymi pomiarowymi, a modelami numerycznymi. W okresie ostatnich kilku lat metoda ta wykorzystywana była wielokrotnie i przetestowana i prezentowana w różnych publikacjach. Poniżej zostały opisane wybrane przykłady odnoszące się do wykorzystania metody MBP w modelach 2D. Jedną z aplikacji metody MBP są magnesy nadprzewodnikowe. Przykładem w tym zakresie może być praca, w której autorzy zastosowali metodę bezparametryczną w symulacji rozkładu pola magnetycznego wewnętrznej wkładki magnesu REBCO o parametrach: wewnętrzny promień 21,5 mm, zewnętrzny promień 58 mm, wysokość 205,5 mm, składającego się z 22 cewek typu *Double Pancake* [145]. Metoda bezparametryczna pozwoliła na dokładniejsze zamodelowanie wpływu prądów ekranowania na rozkład pola magnetycznego w magniesie zaprojektowanym do osiągnięcia centralnego pola o wartości 30 T. Uzyskany model numeryczny przedstawiono na Rys. 4.9a.



Rysunek 4.9. (a) Model $J_c(B, \theta)$ dla taśmy AMSC (b) porównanie danych pomiarowych z wynikami metody MBP 2D dla taśmy AMSC, (c) Model $J_c(B, \theta)$ dla taśmy SuperPower (d) porównanie danych pomiarowych z wynikami metody MBP 2D dla taśmy SuperPower.

Wpływ anizotropii materiału nadprzewodnikowego w cewkach HTS można też analizować z wykorzystaniem MBP, co zostało zaprezentowane w pracy [146].

Pokazano, że lokalizacja najsłabszego punktu w pakiecie cewek zależy od temperatury pracy, co podkreśla znaczenie dokładnego modelowania anizotropii przewodów w rzeczywistych warunkach i może ograniczyć błędy projektowe na etapie wykonywania urządzeń. Metoda MBP wykorzystywana była także do dokładnego modelowania i analizy rozkładu prądów wewnątrz cewki, co jest kluczowe dla wyznaczenia jej parametrów i właściwości podczas procesów ładowania oraz nagłego rozładowania. Wyniki zaprezentowane w pracy [147] wykorzystywały metodę do analizy cewki typu intra-layer no-insulation (LNI). Uzyskany model numeryczny przedstawiono na Rys. 4.9b.

Bardzo szerokim obszarem badań w nadprzewodnictwie są straty zmiennoprądowe AC. Także w analizach numerycznych tego zagadnienia MBP jest użyteczna, co zostało potwierdzone w pracach [148, 149]. Autorzy wykorzystali MBP do modelowania i redukcji strat zmiennoprądowych w cewkach oraz do modelowania i analizy wpływu magnetyzmu podłoża na lokalne wartości prądu krytycznego w transformatorach. Przedstawione Rys. 4.9c charakterystyki prądu krytycznego stanowią przykład wykorzystania MBP symulacjach numerycznych strat zmiennoprądowych AC.

Przykładem wykorzystania MBP do analizy gęstości prądu w taśmach HTS będących elementami nawojowymi transformatorów wysokoczęstotliwościowych jest praca [150]. Autorzy wykorzystali MBP do analizy taśm HTS. Na Rys. 4.9d. zamieszczono wyniki ich badań. Wszystkie wyżej wymienione przykłady wskazują na dużą popularność i użyteczność modeli 2D metody MBP.

4.5. Podsumowanie

Opracowana metoda MBP, która jest wynikiem współpracy międzynarodowej z Karlsruhe Institute of Technology stanowi dobre narzędzie do odwzorowywania wartości krytycznej gęstości prądów w taśmach HTS bazując na wynikach pomiarowych. Wykorzystanie tego narzędzia umożliwia szybką analizę i bezpośrednie wykorzystanie danych pomiarowych w modelowaniu taśm HTS.

Najważniejszą zaletą przedstawionej metody jest brak konieczności znajomości modeli oraz dostosowania ich parametrów. MBP cechuje się szybkością obliczeń w modelowaniu numerycznym. Dodatkowo możliwość sprzężenia metody z komercyjnym oprogramowaniem COMSOL ułatwia jej stosowanie naukowcom wykorzystującym ten pakiet symulacyjny w badaniach.

Metoda MBP posiada także wady, głównie wynikające z przyjętych założeń początkowych oraz przyjętej funkcji wygładzenia danych, która może powodować przeregulowania. Nadaje się w szczególności do aplikacji, w których taśmy pracują w polu magnetycznym porównywalnym z polem własnym, wynikającym z prądów ekranujących. Należy jednak pamiętać iż wykorzystanie metody bezparametrycznej nie daje informacji o parametrach materiałowych taśm HTS.

5

Stanowisko do charakteryzacji taśm HTS

Koncepcja układu pomiarowego, stanowiska badawczego, umożliwiającego realizację pomiarów zależności kątowej prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$ została zaprezentowana w niniejszym rozdziale. Zbudowanie stanowiska badawczego umożliwiającego charakteryzację taśm, cechującego się kompaktową budową, taniego w realizacji oraz wykorzystującego magnesy neodymowe były jednym z głównych celów pracy.

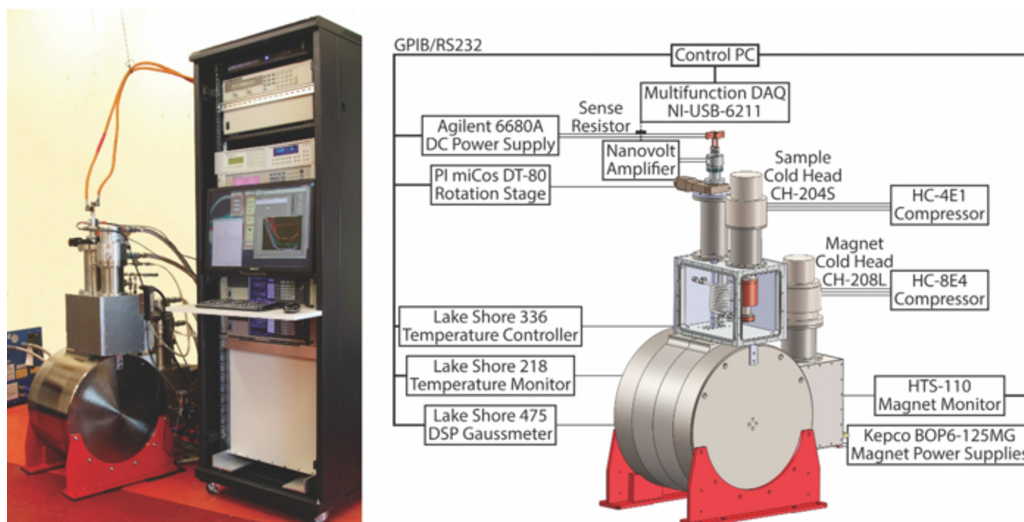
W pierwszej części rozdziału przedstawiono systemy pomiarowe, wykorzystywane na świecie do charakteryzacji taśm HTS (Rozdział 5.1). Koncepcja wykorzystania magnesów trwałych w układzie Halbacha została przedstawiona i omówiona w Rozdziale 5.2. Następnie zostały przedstawione badania w standardzie PoC (Proof of concept), mające potwierdzić funkcjonalność rozwiązania. Rozdział 5.3 opisuje proste badania analityczne mające na celu określenie poziomów indukcji magnetycznej, którą można generować z wykorzystaniem magnesów. Badania analityczne potwierdzono symulacyjnymi (Rozdział 5.4), w których opisano dwa różne podejścia do analizy. W Rozdziale 5.5 opisano projekt i wykonanie stanowiska ze zwróceniem uwagi na rozwiązania konstrukcyjne. W części końcowej zweryfikowano opracowane stanowisko wyżej działania poprzez pomiary pola magnetycznego (Rozdział 5.6) oraz badania laboratoryjne, wyznaczając zależność kątową gęstości prądów krytycznych (Rozdział 5.7).

5.1. Metody charakteryzacji taśm HTS

Charakteryzacji taśm dokonuje się między innymi w celu potwierdzenia parametrów deklarowanych przez producentów. Pomimo ciągłego postępu w technologii produkcji oraz weryfikacji parametrów produkcyjnych na etapie wytwarzania taśm nadprzewodnikowych w dalszym ciągu można obserwować fluktuacje w zakresie wartości prądów krytycznych na długości taśm HTS [151]. Charakteryzacji taśm HTS można dokonać z wykorzystaniem metod bezkontaktowych [152–154], które w większości wykorzystywane są przez producentów taśm oraz kontaktowych, do których należy metoda czterozaciskowa. W metodzie tej realizuje się pomiar spadku napięcia na badanej próbce przy określonym wymuszeniu prądowym. Metoda jest wykorzystywana w laboratoriach z uwagi na swoją prostotę. W celu wyznaczenia wartości prądu krytycznego w taśmach HTS wykorzystuje się z kryterium natężenia pola elektrycznego (zwyczajowo $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ oraz $1 \mu\text{V}/\text{cm}$).

Wśród podstawowych zakresów elektrycznej charakteryzacji taśm można wyróżnić pomiar rezystancji w funkcji temperatury $R(T)$, przeprowadzany szczególnie przy badaniu nadprzewodnikowych ograniczników prądu [155] oraz pomiar zależności kątowej prądu krytycznego $I_c(B, \theta)$ będący tematem niniejszej pracy.

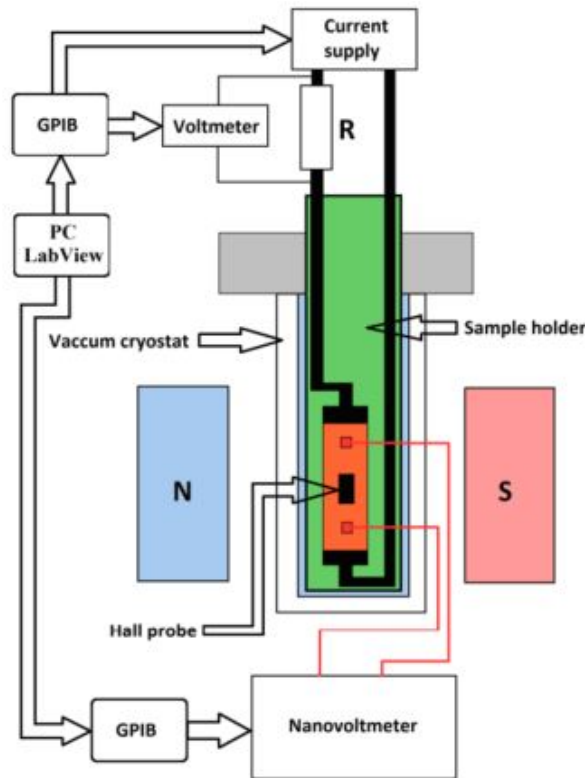
W wielu ośrodkach na świecie obecnie wykorzystywane są systemy do kątowej charakteryzacji taśm HTS, które umożliwiają charakteryzację taśm HTS w szerokim zakresie wartości pól i temperatur. Na szczególną uwagę zasługują systemy opisane w [156, 157] umożliwiające realizowanie pomiarów w pełnym zakresie temperatury (12 K – 90 K) i pola magnetycznego (0 T – 8 T). Na Rys. 5.1 zaprezentowano ten system. Posłużył on też do wykonania pomiarów opisanych w Rozdziale 3.3). System ten umożliwia realizację pomiarów prądów krytycznych $I_c(B, \theta)$ z zakresie kątowym $0^\circ - 240^\circ$. Zbudowany jest z dwóch zasadniczych części: kriogenicznej komory, w której umieszczono nadprzewodnikowy elektromagnes oraz badanej próbki taśmy HTS wraz z oprzyrządowaniem towarzyszącym (kompresorem, sondą temperatury, sondą pola, układem obrotowym) oraz systemem akwizycji danych i układem sterowania elektromagnesu umieszczonym w szafie serwerowej RACK.



Rysunek 5.1. Przykład 1kA systemu do charakteryzacji taśm HTS [157].

Innym przykładem systemu pomiarowego, o mniejszym zakresie pola magnetycznego (0 – 600 mT) jest system opracowany w KIT [158]. System ten umożliwia charakteryzację taśm wysokotemperaturowych w zakresie temperatur 63 K– 77,2 K oraz

zapewnia zmianę orientacji taśmy względem jednorodnego pola magnetycznego $0^\circ - 360^\circ$. System ten w swej budowie wykorzystuje tradycyjne elektromagnesy, generujące jednorodne pole magnetyczne w przestrzeni, w której umieszczona jest próbka wraz z komorą kriogeniczną. Ponadto wyposażony jest w silnik krokowy zapewniający odpowiednie zmiany położenia próbki względem nieruchomych magnesów.



Rysunek 5.2. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego do charakteryzacji taśm HTS [159].

Cechą wspólną większości zautomatyzowanych systemów do charakteryzacji taśm HTS jest wykorzystywanie magneśnicy (elektromagnesu) do generowania jednorodnego pola magnetycznego. Niewątpliwie wykorzystanie magneśnicy umożliwia elastyczność sterowania, niemniej cechuje się znacznymi gabarytami a w zestawie z układem chłodzenia i aparaturą kontrolno-pomiarową systemy są mało mobilne (co widać na na Rys. 5.1).

Potrzeba opracowania mobilnego stanowiska badawczego, umożliwiającego realizację badań z zakresu charakteryzacji taśm wynikała bezpośrednio z braku dostępu do infrastruktury badawczej w czasie pandemii Covid-19. W efekcie powstała koncepcja opisana w dalszej części pracy. W założeniach projektowych mobilny system charakteryzacji taśm miał umożliwić dokonanie badań przy minimalnym wykorzystaniu infrastruktury oraz sprzętu laboratoryjnego, a elementy składowe stanowiska miały być zaprojektowane w taki sposób, aby można było je wykonać w technologii addytywnej, druku 3D.

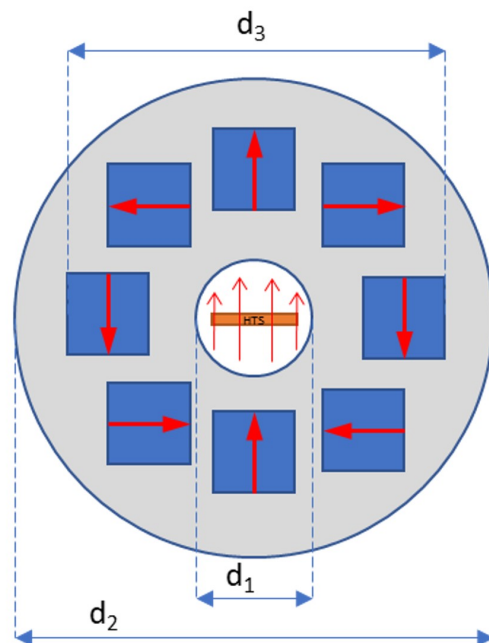
Dodatkowo uwzględniono edukacyjną formę układu pomiarowego, który poprzez swoją prostotę może być stosowany w zajęciach dydaktycznych zastosowań nadprzewodnictwa, prowadzonych przez Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach

5.2. Wytwarzanie jednorodnego pola magnetycznego

Głównym założeniem badań związanych z charakteryzacją taśm HTS jest zapewnienie stabilnych warunków pracy w trakcie pomiarów oraz możliwości regulacji podstawowych parametrów takich jak wartość i kierunek indukcji B , prąd transportu I_t oraz temperatura T .

Koncepcję nowego stanowiska pomiarowego oparto o następujące założenia szczegółowe:

- Wykorzystanie magnesów neodymowych (Nd₂Fe₁₄B) jako źródła pola magnetycznego, co pozwalające na uzyskanie stabilnych i precyzyjnych warunków pomiarowych;
- Możliwość zmiany wartości indukcji jednorodnego pola magnetycznego, skokowo poprzez zastosowanie wymiennych elementów magnetycznych o różnej średnicy, co zwiększa zakres pomiarowy urządzenia;
- Możliwość zmiany kierunku pola magnetycznego względem powierzchni taśmy w pełnym zakresie celem wyznaczenia zależności kątovej $J_c(B, \theta)$ próbki taśmy HTS;
- Zastosowanie nowoczesnych metod szybkiego prototypowania (druk 3D) w celu przyspieszenia procesu produkcji stanowiska, przy zachowaniu założonej złożoności struktury;
- Ograniczenie rozmiarów stanowiska, umożliwiające łatwe przenoszenie i adaptację do różnych warunków laboratoryjnych;
- Możliwość przeprowadzenia pomiarów na próbkach taśmy o długości do 100 mm.



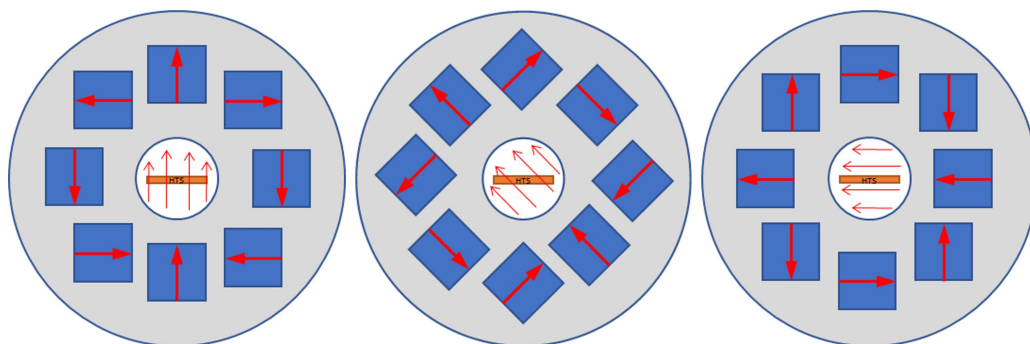
Rysunek 5.3. Koncepcja członu głównego stanowiska pomiarowego do charakteryzacji taśm HTS, wymiary określają odpowiednio: d_1 - średnica obszaru badawczego, d_2 - średnica zewnętrzna układu; d_3 - maksymalny rozstaw magnesów.

Zaprezentowana na Rys. 5.3 koncepcja członu głównego stanowiska pomiarowego bazuje na cylindrycznej macierzy Halbacha wykonanej z sześciennymi magnesami trwałymi. Główną

inspiracją do wyboru takiego rozwiązania była praca [160]. Odpowiednie rozmieszczenie kierunków wektora magnetyzacji M względem siebie, oznaczone czerwonymi strzałkami umożliwia wytworzenie wystarczającego, jednorodnego pola magnetycznego w obszarze w którym umieszczona jest próbka taśmy HTS. Zaznaczone na Rys. 5.3 wymiary odpowiadają odpowiednio: d_1 - średnicy obszaru badawczego, d_2 - średnicy; d_3 - maksymalnemu rozstawowi magnesów.

Zmianę orientacji linii sił pola magnetycznego względem płaszczyzny taśmy HTS zapewniono poprzez odpowiedni obrót magnesów układzie Halbacha względem taśmy. Na Rys. 5.4, zaprezentowano koncepcję obrotu i odpowiadającą jej zmianę linii sił pola magnetycznego dla kątów 0° , 45° i 90° .

W odróżnieniu od opisanych wyżej rozwiązań mechanicznych wykorzystujących ruchomą głowicą, w przypadku zaproponowanej koncepcji postanowiono pozostawić taśmę HTS jako element nieruchomy, układ Halbacha stanowiąc, jako element ruchomy. Rozwiązanie to wyeliminowało problemy z mocowaniem próbki, na które natrafiono podczas wcześniejszych badań [161].



Rysunek 5.4. Rysunek schematyczny przedstawiający koncepcję zmiany linii sił pola magnetycznego względem taśmy HTS.

5.3. Opis analityczny rozkładu indukcji magnetycznej

Analizowany przypadek sprowadza się do wyznaczenia indukcji magnetycznej wewnątrz cylindra dipola Halbacha [162]. Cylinder ze strukturą Halbacha wykonany jest z magnesów trwałych, wytwarzające pole magnetyczne, które penetruje obszar badany. Wektor magnetyzacji M wyznaczyć można z zależności (5.1):

$$\mathbf{M}(\theta) = M_o(\sin 2\theta, \cos 2\theta) \quad (5.1)$$

gdzie: M_o - magnetyzacja remanencji.

Dla dipolu Halbacha zawierającego 8 magnesów na długość fali λ liczba par biegunów p jest wówczas równa liczbie magnesów podzielonej przez 2, ponieważ każdy biegun ma przeciwny biegun. Jednorodna gęstość strumienia magnetycznego wewnątrz cylindra opisana jest poprzez zależność (5.2):

$$B = B_r \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi}{n_M} \right)}{\frac{\pi}{n_M}} \right) \quad (5.2)$$

Dla analizowanej geometrii i przy założeniu, że $d_2 = 60mm$, $d_1 = 40mm$, $B_r = 1,25T$, (dla

magnesu N38) indukcja wynosi(5.3).

$$B = 1,25 \ln\left(\frac{60}{40}\right) \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi}{8}\right)}{\frac{\pi}{8}}\right) = 0,5T \quad (5.3)$$

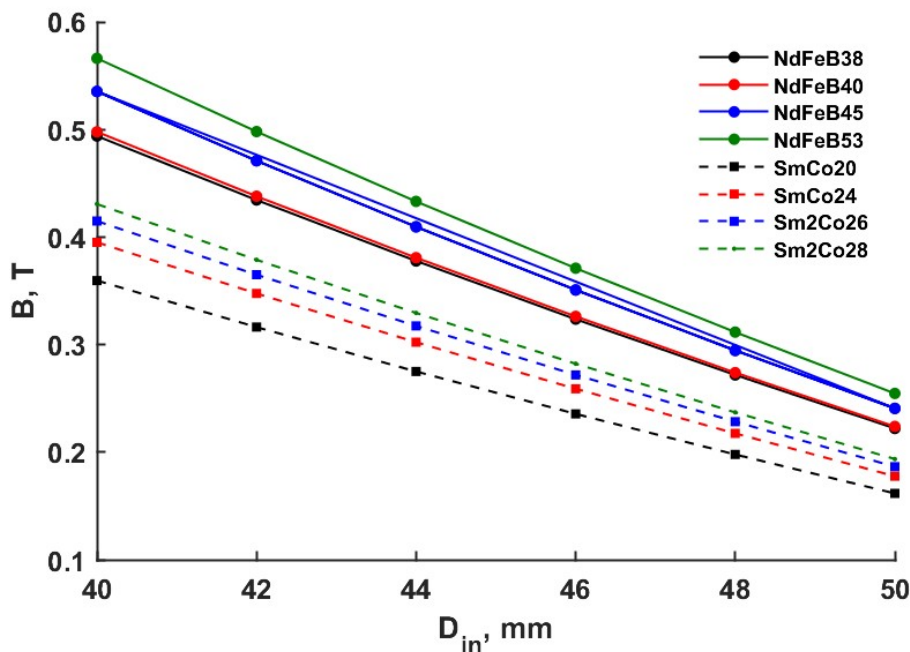
gdzie: B_r – indukcja remanencji, d_2 - średnica zewnętrzna, d_1 - średnica wewnętrzna, n_M - liczba magnesów na długości fali λ

Biorąc pod uwagę ograniczenia konstrukcyjne zaproponowanego układu, przeprowadzono porównanie w zakresie możliwości uzyskania jednorodnego pola magnetycznego o określonych wartościach przy wykorzystaniu magnesów trwałych o różnych parametrach technicznych.Przeanalizowano możliwe zastosowanie magnesów neodymowe (NdFeB) oraz magnesów samarowo-kobaltowych (SmCo) biorąc pod uwagę wartość indukcji remanencji.

Na Rys. 5.5 zestawiono wyniki obliczeń w przypadku zastosowania magnesów SmCo i NdFeB o różnych parametrach. Dzięki zastosowaniu magnesów NdFeB możliwe jest uzyskanie jednorodnego pola magnetycznego o wartości indukcji wyższej, niż w przypadku magnesów SmCo.

Za pomocą wyznaczonej charakterystyki wskazano, iż zmiana geometrii i odległości między magnesami może w skuteczny sposób wpływać na zmianę amplitudy zewnętrznego pola magnetycznego. Wartości wyznaczone analityczne umożliwiają charakteryzację, taśm HTS, w szczególności w polach o małych wartościach, czyli takich, jakie występują np. w kablach nadprzewodnikowych.

Pomimo takich właściwości jak większa odporność na korozję, czy większa temperatura pracy magnesów SmCo, do badań wybrano magnesy NdFeB kierując się czynnikiem ekonomicznym oraz faktem, iż prowadzono już badania na takich magnesach trwałych [22, 163, 164].



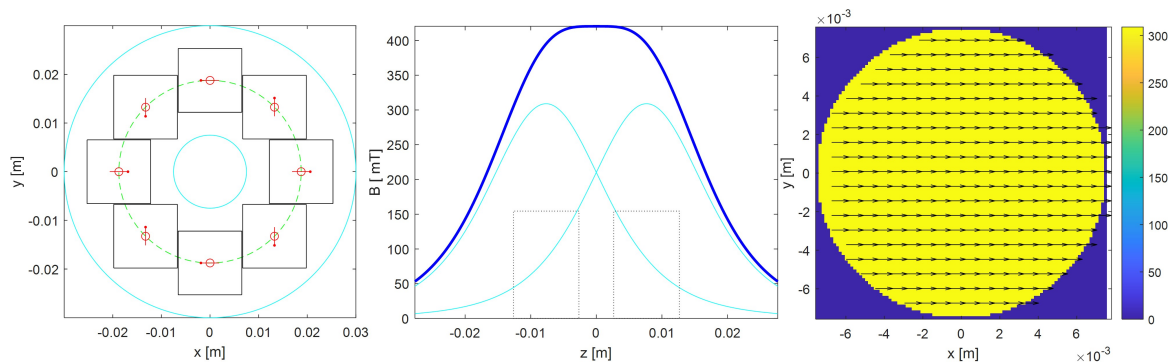
Rysunek 5.5. Porównanie właściwości magnesów neodymowych i samarowo-kobaltowych w cylindrycznym układzie Halbacha.

5.4. Modelowanie rozkładu pola w układzie Halbacha

5.4.1. Modelowanie z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB

W modelowaniu rozkładu indukcji magnetycznej w obszarze badawczym wykorzystano dedykowany skrypt opracowany w MATLAB przez Petera Blümlera [165]. W celu wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w obszarze badawczym przeprowadzono doliczenia numeryczne.

Przyjęto następujące założenia konstrukcyjne: $d_1 = 15$ mm, $d_2 = 60$ mm; $d_{3I} = 50$ mm; $d_{3II} = 45$ mm; $d_{3III} = 40$ mm. Wymiary są adekwatne do wymiarów na podstawie których opracowano model 3D. Do analizy wykorzystano magnesy neodymowe o wymiarach 10 mm x 10 mm. Wykonanie symulacji miało na celu wyznaczenie wartości pola magnetycznego na w obszarze badawczym i potwierdzenie jednorodności rozkładu. W wyniku symulacji otrzymano wartość na poziomie 300 – 325 mT. Wyniki symulacji z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB przedstawiono na Rys. 5.6. Widoczne jest jednorodne pole magnetyczne w obszarze badanym, zaznaczone żółtym kolorem. Wartość pola magnetycznego może być zmieniana poprzez zmianę odległości między magnesami, poprzez rozsuwanie magnesów lub poprzez zmianę gabarytów samych magnesów.



Rysunek 5.6. Wyniki symulacji numerycznej wykonanej w MATLAB: a) rozmieszczenie magnesów na płaszczyźnie Ox-Oy, b) indukcja magnetyczna B wzdłuż osi Oz, c) wartość oraz wektor indukcji.

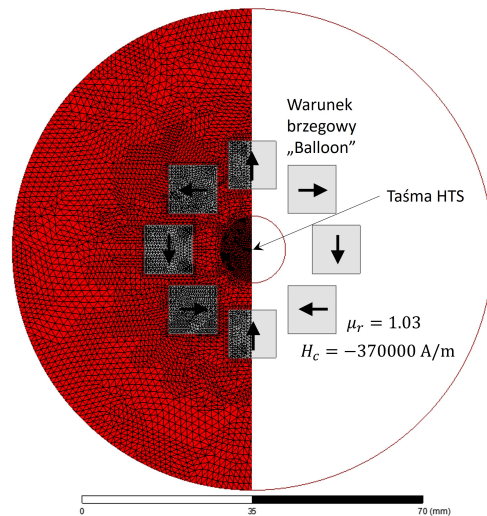
5.4.2. Modelowanie z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS

Rozszerzoną oraz porównawczą analizę numeryczną przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Electronics Desktop. Zjawisko zamodelowano dla geometrii w układzie Halbacha 2D (Rys. 5.3). Przeprowadzono analizę magnetostatyczną. W modelowaniu magnesów neodymowych zwrócono uwagę na ustawianie wektorów magnetyzacji każdego z magnesów. Wyróżniono 3 regiony analizy: A - odpowiadający za przestrzeń badana, w której umieszczona jest próbka HTS, B - region odpowiadający za umiejscowienie magnesów, C - region definiujący obszar powietrza.

Wektorowy potencjał magnetyczny oraz gęstość strumienia magnetycznego dla układu Halbacha były opisane za pomocą równania potencjału wektorowego magnetycznego poprzez zależność między gęstością strumienia magnetycznego, \mathbf{B} , a potencjałem wektorowym magnetycznym, \mathbf{A} .

Zastosowano warunek brzegowy I rodzaju do zewnętrznych granic domeny obliczeniowej, co symuluje otwartą przestrzeń, dzięki czemu fale elektromagnetyczne mogą rozprzestrzeniać się

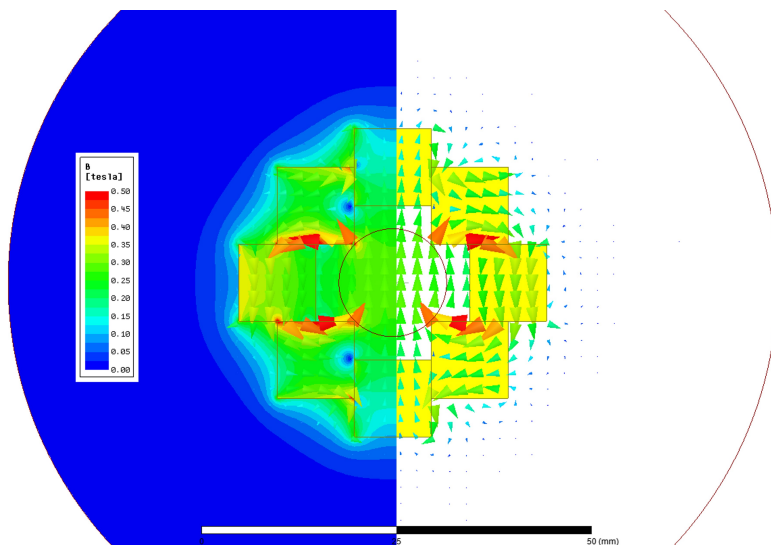
nieskończenie daleko od analizowanego obiektu. Na Rys. 5.7 zaprezentowano obszar roboczy wraz z ustawieniami oraz siatkę dyskretyzującą obszar analizy.



Rysunek 5.7. Siatka wykorzystania do zamodelowania układu Halbacha oraz parametry symulacji.

Dla wymienionych powyżej ustawień symulacyjnych wykonano analizę parametryczną rozkładu indukcji magnetycznej w funkcji zmiany odległości między magnesami d_3 . Na potrzeby analizy wykorzystano oznaczenia (I-), (II), (III). Dla różnych odległości d_3 przyjęto $d_{3-I} - 50$ mm, $d_{3-II} - 45$ mm oraz , $d_{3-III} - 40$ mm. Celem analizy parametrycznej było o określenie zmiany wartości indukcji B na powierzchni taśmy HTS.

Wyniki symulacji zostały przedstawione na Rys. 5.8 oraz Rys. 5.9. Ukazują rozkład gęstości strumienia magnetycznego oraz wartości indukcji we wszystkich analizowanych przypadkach. Wykorzystano oznaczenia (I), (II) i (III) do identyfikacji wyników biorąc za kryterium wartości pola magnetycznego na powierzchni taśmy.



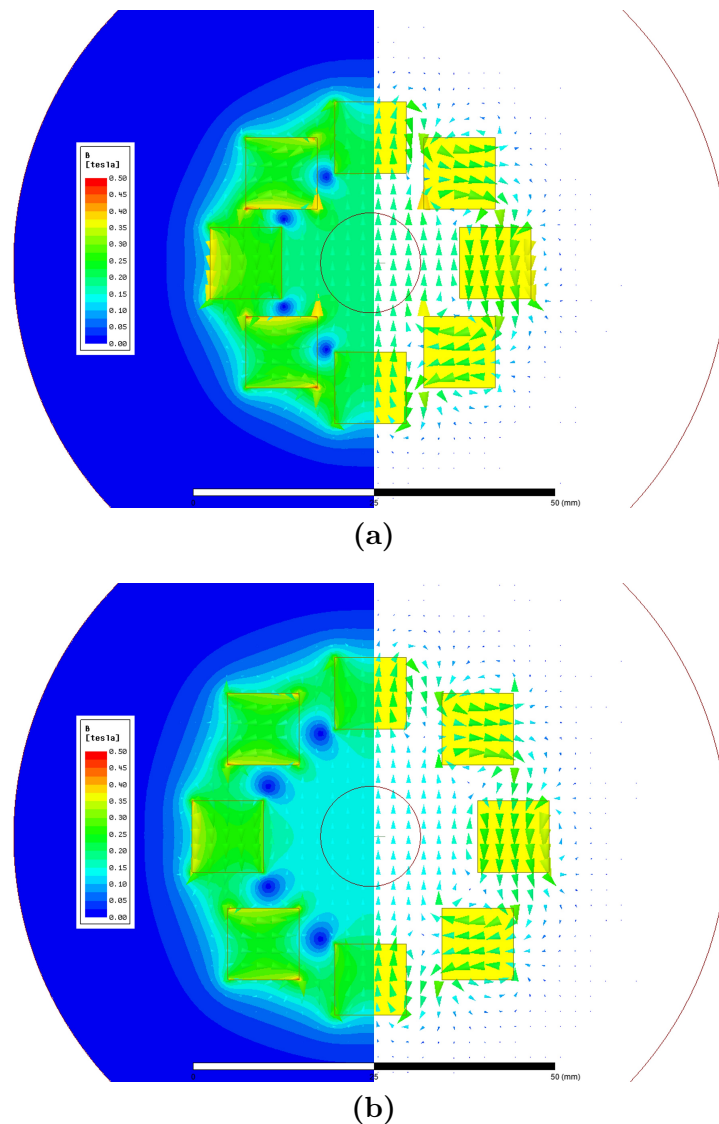
Rysunek 5.8. Wyniki symulacji rozkładu indukcji magnetycznej dla $d_{3-III} - 40$ mm.

W przypadku ustawienia (III) (Rys. 5.8), które odpowiada największej wartości indukcji, widoczne jest, iż z uwagi na bardzo małe odległości między magnesami w miejscach styku

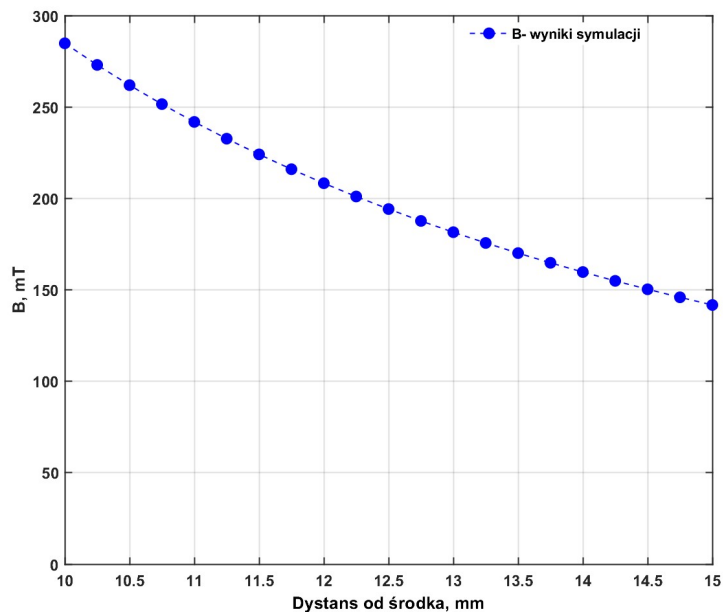
występują ekstrema lokalne indukcji magnetycznej. Niemniej jednak w całym obszarze badawczym wyniki symulacji potwierdzają jednorodność pola magnetycznego.

Wyniki przedstawione na Rys. 5.9, odnoszące się do odległości między magnesami odpowiednio: a) $d_{3II} - 45$ mm, b) $d_{3II} - 50$ mm, wskazują, iż zmiana odległości między magnesami wpływa korzystnie na jednorodne pole magnetyczne w obszarze badanym.

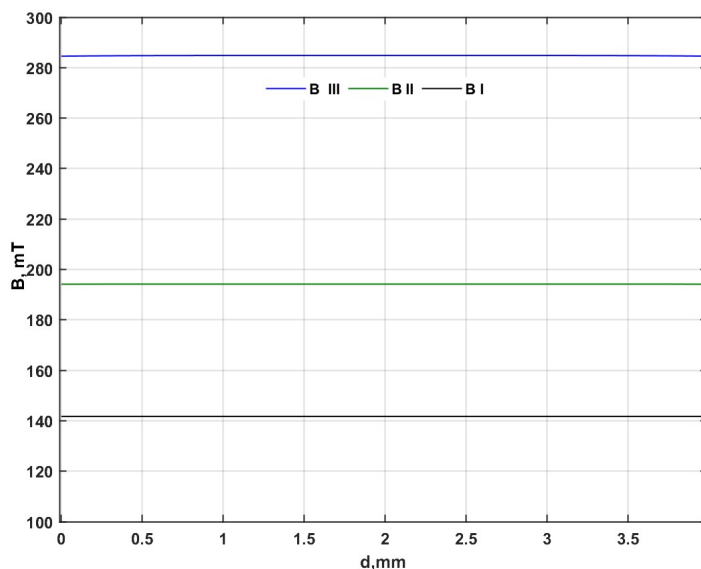
Wyniki obliczonej średniej wartości indukcji w obszarze badawczym w funkcji odległości od jego środka zostały przedstawione na Rys. 5.10. Wyniki dla trzech różnych zestawów prezentują się następująco; dla $B_I \approx 150$ mT, $B_{II} \approx 200$ mT, $B_{III} \approx 300$ mT. Następuje zmniejszenie wartości indukcji magnetycznej w obszarze badanym w funkcji odległości magnesów od środka układu, co jest zgodne z analizą teoretyczną. Z kolej uzyskane wartości indukcji na powierzchni taśmy HTS, znajdującej się centralnie w obszarze zostały przedstawione na Rys. 5.11. Linia prosta wskazuje, iż na powierzchni całej taśmy występuje jednorodny rozkład indukcji.



Rysunek 5.9. Wyniki symulacji rozkładu indukcji magnetycznej dla a) $d_{3-II} - 45$ mm, b) $d_{3-I} - 50$ mm



Rysunek 5.10. Zależność wartości indukcji magnetycznej B w funkcji odległości magnesów od krawędzi obszaru badawczego



Rysunek 5.11. Charakterystyka indukcji w funkcji szerokości taśmy. Wartości odpowiadające indukcji na powierzchni taśmy HTS w obszarze badawczym dla konfiguracji (I), (II), oraz (III).

Przeprowadzenie dwuetapowej weryfikacji założeń koncepcyjnych poprzez wykorzystanie narzędzi symulacji numerycznej potwierdziło słuszność koncepcji. Po zrealizowaniu pierwszego etapu, przystąpiono do kolejnego związanego z zaprojektowaniem i wykonaniem stanowiska badawczego umożliwiającego wykonanie badań weryfikacyjnych.

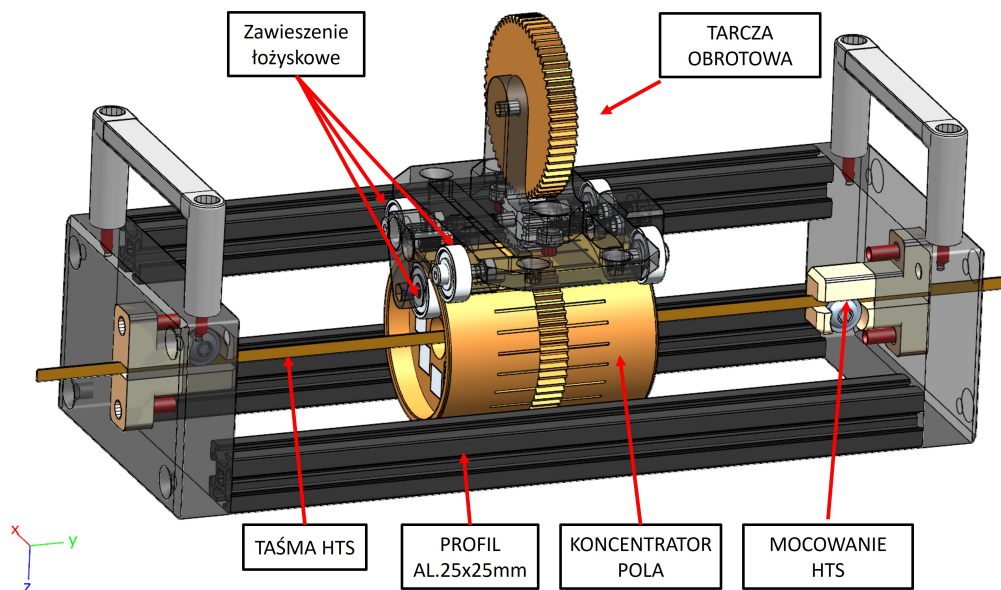
5.5. Stanowisko badawcze - projekt i realizacja

Projekt mobilnego stanowiska badawczego służącego do wykonywania charakteryzacji taśm HTS opracowano w oparciu o następujące założenia początkowe:

- Wykonanie źródła pola magnetycznego w postaci magnesów trwałych w macierzy Halbacha, "koncentratora pola" wraz z układem mocowań zapewniającego pełny obrót wektora indukcji względem badanej próbki taśmy HTS;
- Wykonanie układu mocowania taśm HTS zapewniającego sztywność taśmy w trakcie pomiarów;
- Ograniczenia gabarytowe stanowiska (do 300 mm długości 200 mm szerokości);
- Wykonanie elementów stanowiska w technologii druku 3D;
- Uniwersalność stanowiska, możliwość przeprowadzenia badań różnych konfiguracji magnesów (charakteryzacja taśm w polu jednorodnym, niejednorodnym wzdłużnie itp.).

Wynikiem prac koncepcyjnych i projektowych jest stanowisko zaprezentowane schematycznie na Rys. 5.12. Na rysunku można wyróżnić element bazowy w postaci koncentratora pola, mocowania taśm HTS, taśmę HTS oraz elementy konstrukcji i ramę nadającą sztywność w trakcie pomiarów. Całkowita długość zaprojektowanego stanowiska wynosi 260 mm.

Stanowisko spełniało wszystkie założenia konstrukcyjne w zakresie założonej funkcjonalności. Element główny stanowiska osadzony był centralnie na standardowych profilach aluminiowych (25 mm x 25 mm). Dzięki ruchomej tarczy oraz przekładni zębatej może być obracany względem taśmy HTS umieszczonej centralnie. Ruchoma tarcza jest jednocześnie wskaźnikiem kątowym z podziałką co 15°.



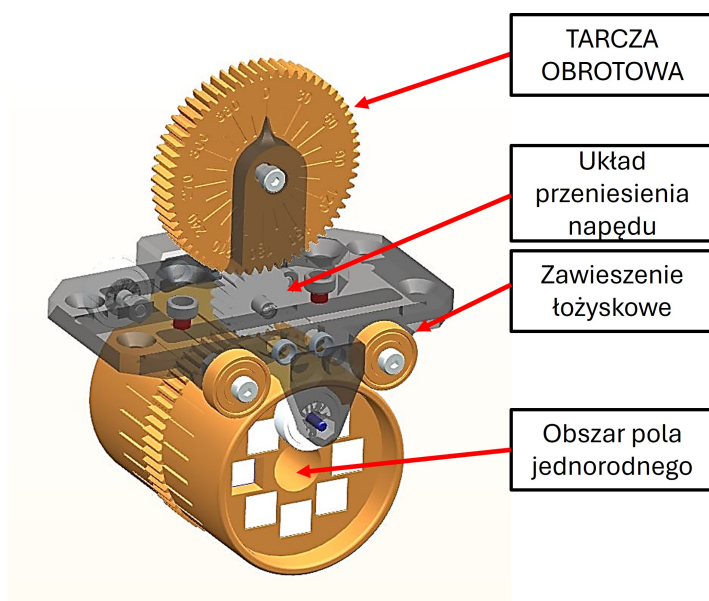
Rysunek 5.12. Wizualizacja 3D projektu stanowiska testowego dla taśm HTS.

Kluczowym elementem stanowiska badawczego jest koncentrator pola, zamocowany na łożyskach kulkowych, umożliwiających obrót i zmianę orientacji pola magnetycznego względem do taśmy. Koncentrator składa się trzech elementów, z których skrajny umożliwia osadzenie w układzie Halbacha jednego rzędu magnesów. Środkowy, będący jednocześnie przekładnią, umożliwia przymocowanie rzędu jednego magnesu w kształcie sześciianu o boku $a = 10$ mm. Zapewnia to możliwość analizy pola magnetycznego wzdłuż taśmy HTS. Rysunek samego koncentratora pola, został zaprezentowany na Rys. 5.13. Widoczne są na nim elementy składowe, takie jak tarcza obrotowa, układ przenoszenia napędu w postaci przekładni zębatej oraz zawieszenie łożyskowe.

Badana próbka HTS jest mocowana zgodnie z koncepcją, do specjalnie do tego celu zaprojektowanych uchwytów pomiarowych. Uchwyty pomiarowe wykonane z miedzi celem zmniejszenia oddziaływań termicznych przy połączeniach silnoprądowych. Należy nadmienić, iż uchwyty mocujące taśmę stanowiły pierwszy element przekonstruowany, po badaniach weryfikacyjnych gdyż przyjęta koncepcja docisku powodowała uszkodzenia badanych elementów. Nowa wersja oparta o układ miedzianych płaskowników niwelowała ten błąd.

Większość elementów stanowiska badawczego została wykonana z poliamidu PLA, który jest najpopularniejszym materiałem stosowanym w druku 3D. Materiał ten cechuje się wytrzymałością na rozciąganie w zakresie 50 – 70 MPa, co oznacza, że jest stosunkowo wytrzymały. Posiada również zbliżona wytrzymałość na ściskanie. Założono, że w temperaturze wrzenia ciekłego azotu właściwości mechaniczne będą mniejsze, dlatego też przy wydruku elementów zastosowano duże wypełnienie materiałem. Za wyborem technologii druku 3D przemawiały dwa aspekty. Pierwszy był aspektem ekonomicznym, a drugi związany z możliwością szybkiego prototypownia i wprowadzania modyfikacji w konstrukcji na etapie testowania.

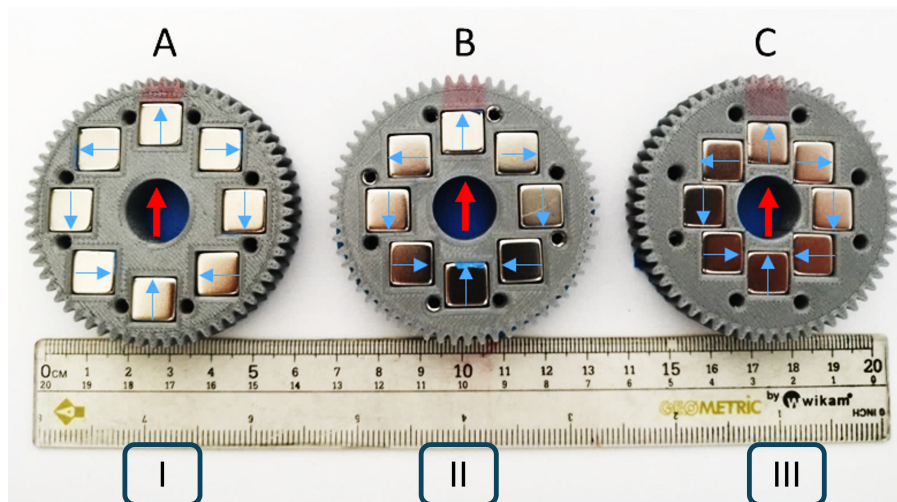
Podsumowując zaprojektowano i wykonano autorskie stanowisko umożliwiające charakteryzację taśm HTS. Projekt został wykonany w oparciu o wszystkie założenia początkowe. Wykonane stanowisko przeszło próby zanurzenia w ciekłym azocie czym potwierdzono jego użyteczność mechaniczną.



Rysunek 5.13. Wizualizacja modelu 3D opracowanego koncentratora pola bazującego na cylindrycznej macierzy Halbacha.

5.6. Pomiary pola magnetycznego

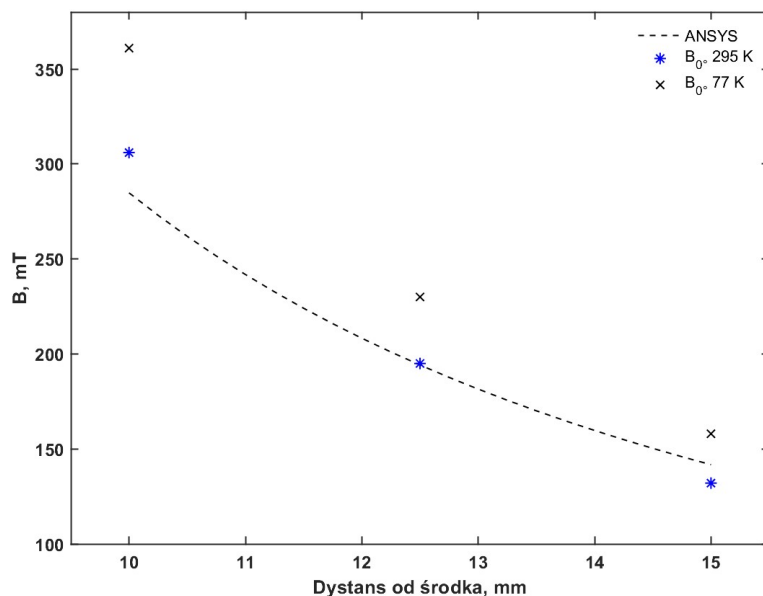
Na podstawie przeprowadzonych symulacji oraz projektu wykonano trzy tarcze z magnesami w układzie Halbacha, stanowiące główny element odpowiedzialny za generowanie zewnętrznego pola magnetycznego do badania właściwości taśm HTS. W układach wykonanych z zastosowaniem technologii addytywnej 3D, zamocowano magnesy neodymowe tak, aby ich wektory magnetyzacji tworzyły układ Halbacha. Na Rys. 5.14 zaprezentowano wykonane elementy wraz z naniesionymi wektorami magnetyzacji. Oznaczenia są tożsame z oznaczeniami przyjętymi w symulacji ANSYS.



Rysunek 5.14. Testowe układy Halbacha dla różnych wartości pól magnetycznych, odpowiadających odległościom a) $d_{3-I} = 50$ mm, b) $d_{3-II} = 45$ mm, c) $d_{3-III} = 40$ mm.

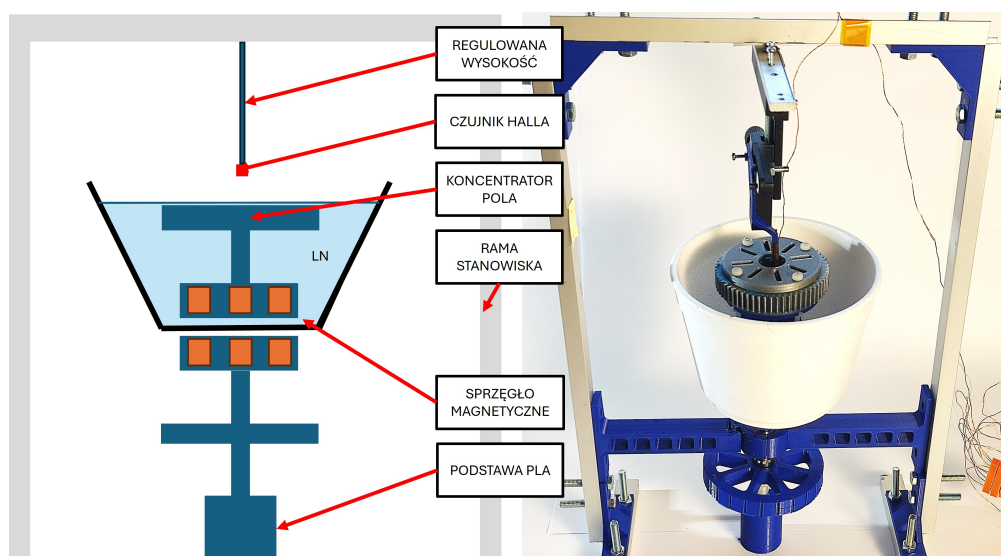
Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych (Rozdział 5.4) porównano z pomiarami pola magnetycznego wykonanymi dla skonstruowanych układów Halbacha przy użyciu dwóch metod pomiarowych. W pierwszej metodzie pomiarowej wykorzystano pomiar bezpośredni z uczuciem gausometru FH - 51 produkcji Magnet-Physik, który był wyposażony w sondę THS-TB51. Pomiaru dokonano w centralnym punkcie obszaru roboczego, który odpowiadał umiejscowieniu taśmy HTS. Pomiary zostały przeprowadzone dla dwóch temperatur: temperatury ciekłego azotu ($T = 77$ K) oraz temperatury pokojowej ($T = 295$ K) celem zidentyfikowania zmiany wartości pola magnetycznego magnesów trwałych w tych temperaturach zmierzono wartość pola, w Tabeli B.5, znajdującej się w Dodatku B.1.3 zamieszczono wyniki pomiarów.

Schłodzenie magnesów do temperatury $T = 77$ K spowodowało wzrost średniej wartości B o około 20 procent. Wzrost indukcji magnetycznej w niskiej temperaturze jest zjawiskiem korzystnym w procesie charakteryzacji taśm HTS pracujących w zewnętrznym polu magnetycznym. Wyniki pomiarów porównano z wynikami symulacji komputerowej i przedstawiono na Rys.: 5.15. Poszczególne punkty pomiarowe reprezentują odpowiednie macierze Halbacha, a wyniki w przypadku magnesów w temperaturze otoczenia ($T = 295$ K) jakie uzyskano to: dla $B_I = 132$ mT, $B_{II} = 195$ mT, $B_{III} = 306$ mT. W przypadku magnesów w schłodzonych w ciekłym azocie ($T = 77$ K) odpowiednio $B_I = 158$ mT, $B_{II} = 230$ mT, $B_{III} = 361$ mT.



Rysunek 5.15. Porównanie średnich wartości indukcji w obszarze badanym dla symulacji oraz ciepłego i zimnego magnesu trwałego. Linia przerywana- wyniki symulacji, kolorem czarnym magnesy schłodzone 77 K, kolorem niebieskim pomiar w temp 295 K.

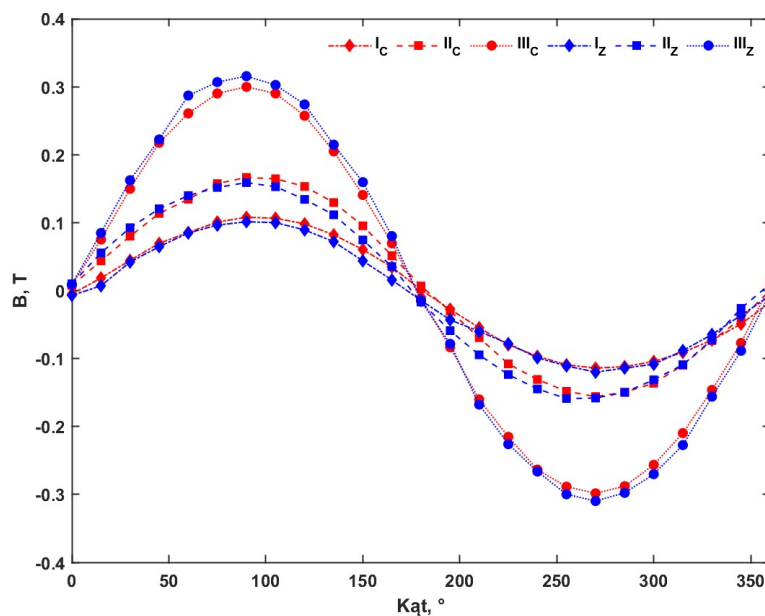
W celu wyznaczenia kątowej zależności wartości indukcji magnetycznej dla poszczególnych układów Halbacha zaprojektowano i wykonano konstrukcję dedykowanego stanowiska pomiarowego. Na Rys. 5.16 zaprezentowano koncepcję i prototyp stanowiska z czujnikiem Halla. Konstrukcja do badania pola magnetycznego została opracowana w technologii druku 3D oraz z wykorzystaniem sprzęgła magnetycznego zapewniającego połączenie mechaniczne pomiędzy częścią ruchomą, a pojemnikiem z ciekłym azotem. Pomiar został zrealizowany w centralnym punkcie obszaru roboczego. Czujnik został wstępnie skalibrowany przy zasilaniu napięciem referencyjnym 10 V. Dokonano zapewniono dokonanie pomiarów pełnego obrotu w zakresie $0^\circ - 360^\circ$.



Rysunek 5.16. Rysunek ideowy oraz wykonanie układu do wyznaczania kątowej zależności indukcji magnetycznej w układach Halbacha.

Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej $B(\theta)$, zmierzonej środku ukł adów Halbacha przedstawiono na Rys. 5.17, gdzie poszczególne temperatury rozrózniono kolorami. Wyniki dotycz ą wszystkich sześciu konfiguracji, zarówno dla temperatury $T = 295$ K jak i dla temperatury ($T = 77$ K. Podobnie jak w poprzednim pomiarze dokonany m teslomierzem, widoczny jest wzrost wartości indukcji B), Zaobserwowano wzrost indukcji nie jest tak duży jak w poprzednim przypadku. Nie zaobserwowano znaczących r oznic w zakresie wartości pola magnetycznego względ pomiarów w ciekłym azocie i temperaturze pokojowej. Dodatkowo zauważalne jest przesunięcie wykresów przy zmianie temperatury, w szczególności w zakresie kątowym $160^\circ - 200^\circ$.

Warto c maksymalna w każdym z przypadków występuje przy kącie 90° i wynosi odpowiednio: dla magnesów ciepłych ($T = 295$ K) $B_I = 110$ mT, $B_{II} = 117$ mT, $B_{III} = 300$ mT. W przypadku magnesów w schłodzi ym w ciekłym azocie ($T = 77$ K) odpowiednio $B_I = 111$ mT, $B_{II} = 116$ mT, $B_{III} = 319$ mT. W Tabeli B.6, zamieszczonej w dodatku B.1.4 przedstawiono wyniki pomiarów, na podstawie których wykreślono charakterystykę z Rys. 5.17.



Rysunek 5.17. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej w obszarze roboczym przeprowadzone czujnikiem Hala CYSJ362A, dla trzech róznych ukł ad w magnesów w dwóch róznych temperaturach: c - T_{295} K, z - T_{77} K.

Podsumowuj ąc, w ramach badań por ównano wartości pola magnetycznego w obszarze badawczym dla magnesów w dwóch temperaturach: ciekłego azotu i otoczenia (pokojowej). Do tego celu wykorzystano dwie metody pomiarowe, które w zakresie maksymalnego pola s ą zbieżne, natomiast w zakresie mniejszych wartości pól r ozni ą nieznacznie się od siebie. Pomiary wykonane czujnikiem Halla nie wykazały wpływu temperatury na zmierzona  wartości indukcji.

Najistotniejsz ą spraw ą związaną z walidacj ą pomiarow ą wartości indukcji jest fakt, że uzyskano zakres wartości indukcji pozwalaj ący na charakteryzację taśm HTS, w zakresie zał ożonych u pracy.

5.7. Pomiary wstępne prądów krytycznych

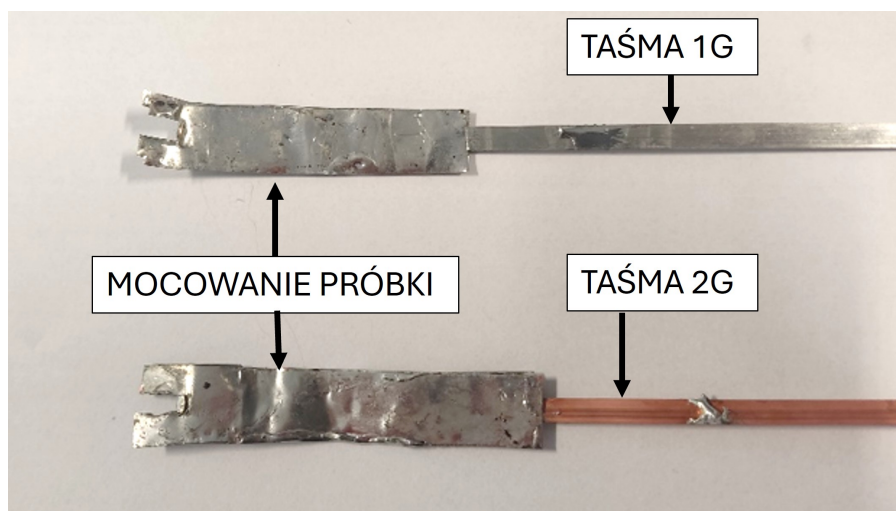
Wykonanie pomiarów wstępnych prądów krytycznych było kolejnym krokiem mającym potwierdzić funkcjonalność zaprojektowanego stanowiska i zasadność koncepcji wykorzystania magnesów trwałych w procesie charakteryzacji taśm HTS. Pomiary zostały zrealizowane na dwóch wybranych taśmach HTS BiSCCO produkcji American Superconductor oraz YBCO produkcji SuperOx, reprezentujących taśmy 1G i 2G oraz różne technologie produkcji, co za tym idzie różny sposób oddziaływania pola magnetycznego na prądy krytyczne.

W Tabeli 5.1 zestawiono podstawowe parametry techniczne badanych taśm. Taśmy te cechują się zbliżonymi wartościami prądów krytycznych, mającymi wartość około 150A i zbliżoną szerokością 4 mm oraz 4,16 mm. Zarówno grubość, jak i krytyczna średnica gięcia w przypadku taśmy 2G jest mniejsza.

Tabela 5.1. Tabela zestawienia parametrów badanych taśm HTS i ich podstawowe parametry.

	BiSCCO AMSC	YBCO SuperOx 2G
Min prąd krytyczny I_c , pole własne, 77 K	145 A	150 A
Średnia grubość	0,31 mm \pm 0,02 mm	0,06 mm
Średnia szerokość	4,16 mm \pm 0,02 mm	4 mm
Max. znamionowe odkształcenie rozciągające	0,35 %	0,05%
Krytyczna średnica zagięcia	50 mm	15 mm

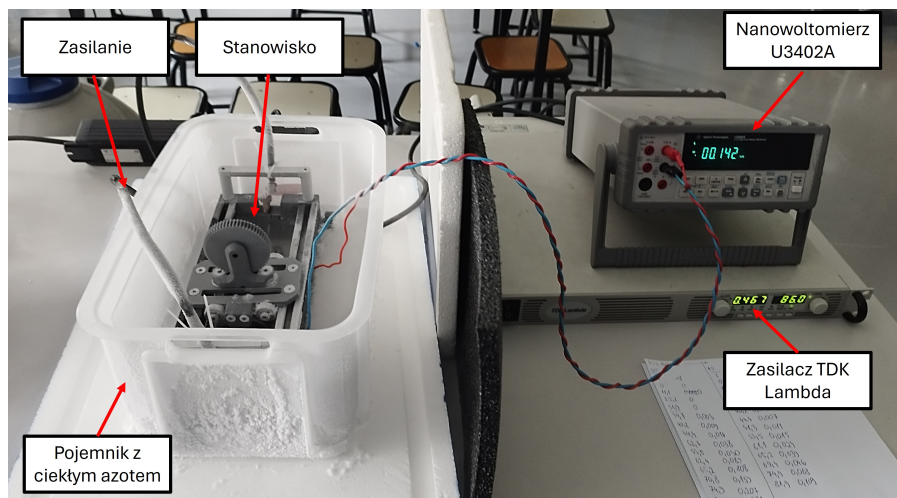
Dokonano przygotowania próbek taśm HTS przed wykonaniem charakteryzacji. W tym celu odpowiednio odmierzone próbki zostały po obu stronach wyposażone w zaciski. Zaciski miały na celu zwiększenie powierzchni czynnej taśmy oraz ochronę przed uszkodzeniem mechanicznym. Do pomiaru prądów krytycznych wykorzystano metodę czterozaciskową oraz zastosowano kryterium natężenia pola elektrycznego $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ do wyznaczenia prądów krytycznych (Rozdział 5.1). Ustalono długość odcinka poddawanego badaniom na 135 mm i w takiej odległości od siebie przylutowano przewody pomiarowe do pomiaru spadku napięcia. Na Rys. 5.18 zaprezentowano taśmy przygotowane do pomiarów.



Rysunek 5.18. Rysunek przedstawiający przygotowanie taśm HTS; taśmy 1G - BiSCCO (AMSC) oraz taśmy 2G -YBCO (SuperOx) wraz z zaciskami

Badania z wykorzystaniem metody czterozaciskowej cechują się prostotą. Jako źródło zasilania wykorzystano zasilacz TDK Lambda o wydajności prądowej 200 A. Spadek napięcia na odcinku o długości $l = 135$ mm mierzony był z wykorzystaniem nanowoltomierza U3402A produkcji Keysight. Dla dobranego kryterium natężenia pola elektrycznego przekroczenie wartości $13,5 \mu\text{V}$ pozwalało na wyznaczenie prądu krytycznego z charakterystyki prądowo-napięciowej. Wyniki pomiaru spadku napięcia odczytywane są bezpośrednio z nanowoltomierza, gdyż uznano, że dla badań weryfikacyjnych nie ma konieczności stosowania systemów akwizycji danych.

Na Rys. 5.19 zaprezentowano układ pomiarowy, wykorzystany do charakteryzacji taśm HTS. Układ składał się z wyżej wymienionych zasilacza (TDK Lambda) i nanowoltomierza (U3402A) oraz zaprojektowanego stanowiska z układu magnesów Halbacha, które zostało umiejscowione w pojemniku z ciekłym azotem. Zasilane doprowadzone przewodem o średnicy 16 mm^2 a pomiar spadku napięcia o średnicy 1 mm^2 .



Rysunek 5.19. Układ pomiarowy w trakcie wykonywania badań weryfikacyjnych z wyszczególnionymi elementami składowymi.

Pomiary zależności kątowej były realizowane ze skokiem co 15° . Dla każdego punktu pomiarowego wyznaczone zostały charakterystyki prądowo-napięciowe oraz wyznaczono wartości prądów krytycznych. Wartości prądów krytycznych wyznaczono z wykorzystaniem logarytmicznej linearyzacji, która polegała na wykorzystaniu własności logarytmów do przekształcenia równania wykładniczego tak, aby można było zastosować regresję liniową i wyznaczyć parametry charakterystyczne nadprzewodnika, takie jak prąd krytyczny I_c oraz wykładnik potęgowy n .

Wartość prądu krytycznego wyznaczano z prawa potęgowego (2.32), które dla metody czterozaciskowej przyjmuje postać (5.4).

$$U = U_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (5.4)$$

gdzie: U - napięcie badanej próbki nadprzewodnika, U_c - napięcie krytyczne, I_c - prąd krytyczny nadprzewodnika, n - wykładnik potęgowy.

Proces logarytmicznej linearyzacji dotyczącej wzoru (5.4) przeprowadzono następująco. W pierwszej kolejności należy wykonać obustronne logarytmowanie (5.5). Przekształcając wzór (5.5) otrzymano (5.6).

$$\ln\left(\frac{u}{u_c}\right) = \ln\left(\frac{I}{I_c}\right)^n = n \cdot \ln\left(\frac{I}{I_c}\right) \quad (5.5)$$

$$\ln\left(\frac{u}{u_c}\right) = n \cdot \ln(I) - n \cdot \ln(I_c) \quad (5.6)$$

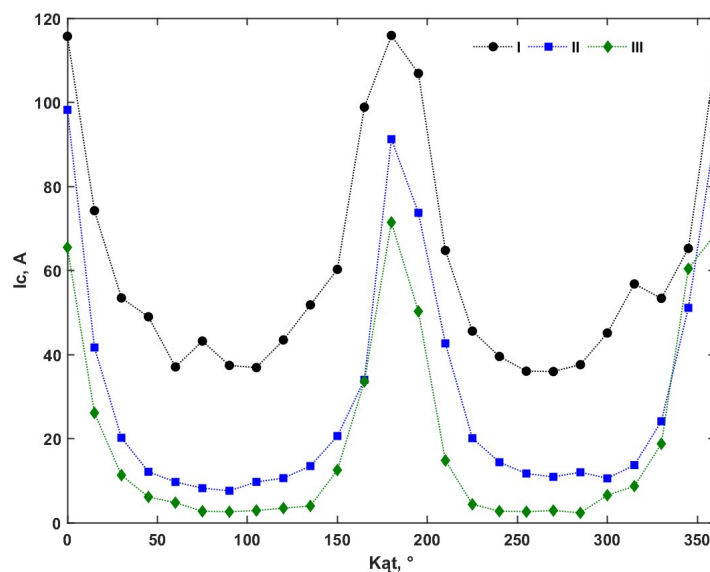
Przekształcając równanie (5.6) do postaci liniowej $y = a \cdot x + b$, otrzymano wyrażenie będące funkcją liniową, z którego wyznaczono odpowiednio prąd krytyczny I_c (5.8) i wykładnik potęgowy n (5.9). Przedstawiona procedura jest wygodna przy opracowywaniu systemów automatycznej akwizycji danych, nie wymaga ręcznego doboru i ustalania punktu przecięcia wynikającego z kryterium natężenia pola elektrycznego.

$$y = n \cdot \ln(I) + b \quad (5.7)$$

$$I_c = 10^{-\frac{b}{n}} \quad (5.8)$$

$$n = \frac{y - b}{\ln(I)} \quad (5.9)$$

Wyniki badań związanych z odwzorowaniem zależności kątowej prądów krytycznych taśm HTS przedstawiono na Rys. 5.20. Wartości prądów krytycznych wyznaczono dla poszczególnych kątów θ w zakresie $0^\circ - 360^\circ$ z krokiem pomiarowym co 15° . Badania wykonano dla trzech układów Halbacha przedstawionych na Rys. 5.14. Wartości prądów krytycznych są zgodne z modelem eliptycznym. Dla taśm BiSCCO występuje względna symetria w odniesieniu do osi obrotu. Maksymalne wartości prądów krytycznych otrzymano do taśmy ułożonej równoległe do linii sił pola. Otrzymano następując wartości: $B_I = 158$ mT, $B_{II} = 230$ mT, $B_{III} = 361$ mT. Wyniki pomiarów wskazują na bardzo dużą redukcję prądów krytycznych dla ustawienia taśmy prostopadle względem linii sił pola.

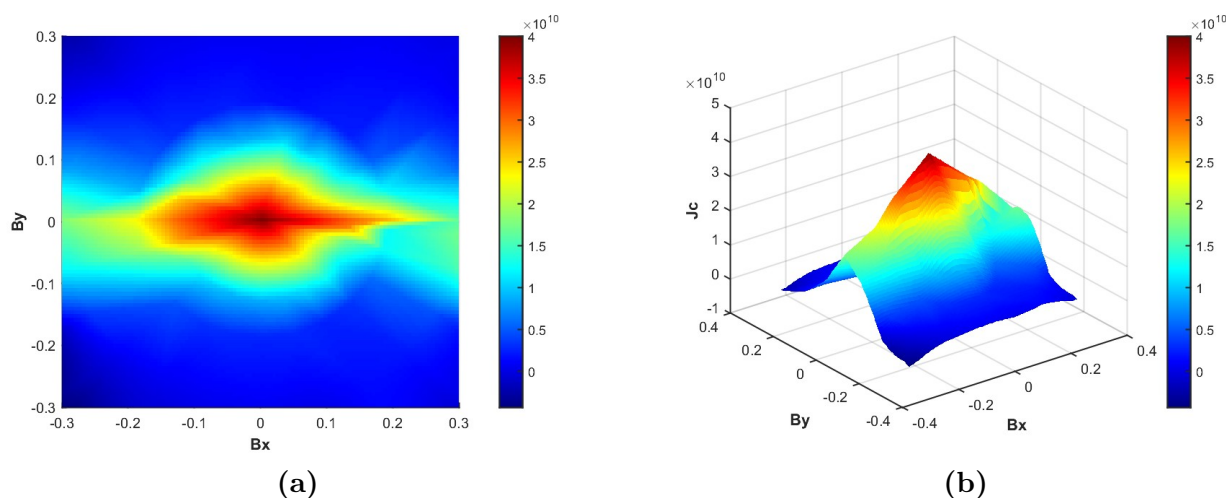


Rysunek 5.20. Wyniki pomiarów charakterystyki kątowej $I_c(B, \theta)$ taśmy AMSC, dla trzech różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor niebieski, B_{III} - kolor zielony.

Przeprowadzone pomiary potwierdzały zgodność wyników z oczekiwaniami, zaobserwowano anizotropię taśm. Sposób pomiarów wymaga dalszych udoskonaleń, co jest przedmiotem badań opisanych w dalszej części rozdziału

Analizując wyniki pomiarów można potwierdzić funkcjonalność koncepcji w zakresie wykonania stanowiska do charakteryzacji taśm HTS. Odnosząc się bezpośrednio do wyników wpływu pola magnetycznego na wartości prądu krytycznego I_c , widoczny jest eliptyczny kształt charakterystyki i symetria kształtu charakterystyki. Zauważalne jest iż przyjęta rozdzielczość zmiany kąta obrotu θ co 15° jest niewystarczająca do prawidłowego odwzorowania charakterystyki. Przesunięcie ekstremów lokalnych względem charakterystyki przedstawionej na Rys. 4.2 wynika z założenia innego o 90° wynika z założenia punktu startowego pomiaru. Rys. 5.20 założono, że 0° , to sytuacja, w której taśma HTS jest ustawiona równolegle względem liniami sił pola, z kolei na Rys. 4.2 założono, że 0° to ustawienie taśmy prostopadle względem tych linii.

Wyniki pomiarów wykorzystano do wyznaczenia modeli prądów krytycznych J_c , w tym celu wykorzystano opisaną wcześniej metodę bezparametryczną MBP (Rozdział 4). Model gęstości prądu w ujęciu 1D przedstawiono na Rys. 5.21a. Widoczne są składowe prostopadłe i składowe równoległe pola magnetycznego. Model jest rozciągnięty względem osi O_x . Odwzorowanie wyników pomiarów powoduje, iż na rysunku widoczna jest nieregularność w zakresie prądu krytycznego. Model 3D zaprezentowany na Rys. 5.21b wskazuje maksymalną wartość J_c na poziomie 4×10^{10} A/mm², dodatkowo charakterystyka jest bardzo stroma.

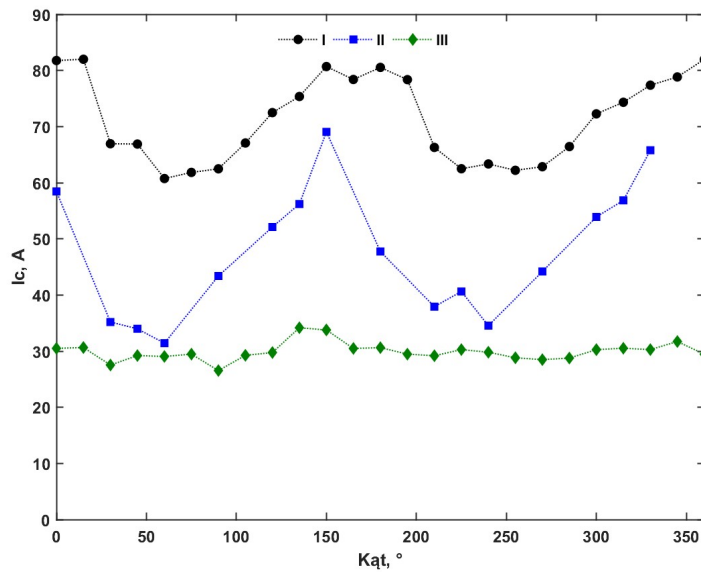


Rysunek 5.21. Modele gęstości prądów $J_c(B, \theta)$ wykonane metodą MBP dla taśmy BiSCCO AMSC w ujęciu 1D w programie MATLAB; a) model 2D, b) model 3D.

W przypadku badań taśmy taśmy 2G produkcji SuperOx otrzymano charakterystykę, która wskazuje na anizotropowe właściwości oraz zastosowanie technologii pinningu. Taśma 2G cechuje się mniejszą grubością oraz mniejszą sztywnością, co było problematyczne podczas mocowania próbki, tym bardziej iż nie zaprojektowano konstrukcji wsporczej dla taśmy. Wykorzystano zestaw trzech układów Halbacha w celu wytworzenia jednorodnego pola magnetycznego na powierzchni taśmy. Charakterystykę kątową zależności prądów krytycznych przedstawiono na Rys. 5.22.

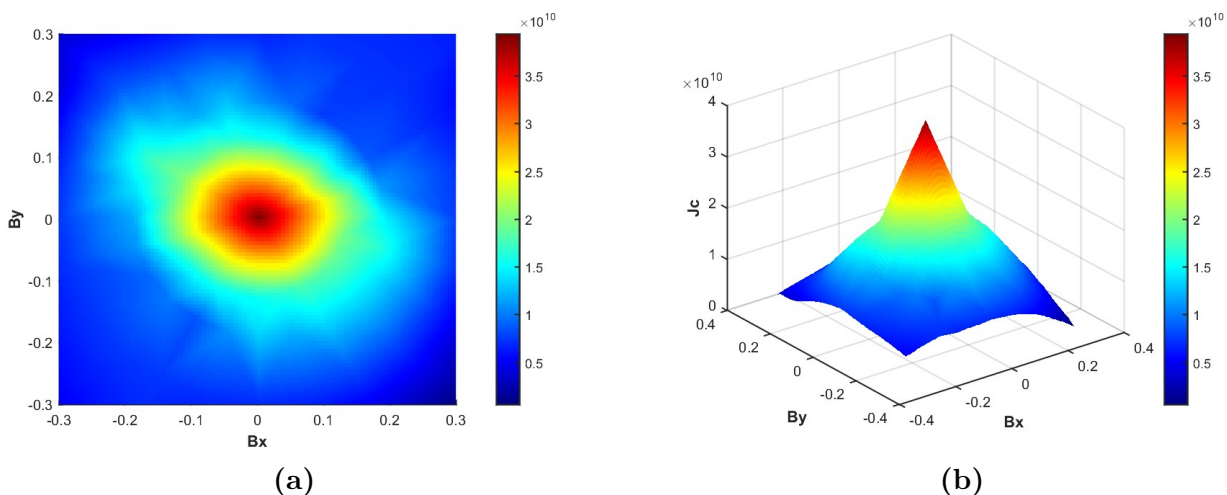
W przypadku dwóch pierwszych charakterystyk dla $B_I = 158$ mT, $B_{II} = 230$ mT zaobserwowano charakterystyki o pewnej systematyce kątowej. Określono położenia kątowe,

dla których występują ekstrema wartości. Dla $B_{II} = 230$ mT pomiary wykonano dla mniejszej liczny punktów, związane to było z uszkodzeniem próbki. Zmniejszenie rozdzielczości pomiarowej wpłynęło niekorzystnie na kształt charakterystyki.



Rysunek 5.22. Wyniki pomiarów charakterystyki kątowej $I_c(B, \theta)$ taśmy SuperOx, dla trzech różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor niebieski, B_{III} - kolor zielony.

Pomiary wykonane dla pola $B_{III} = 361$ mT cechują się bardzo wygładzoną charakterystyką. Porównując wyniki tych pomiarów do danych z innego systemu badawczego (Rozdział 4), można stwierdzić, iż jest to tendencja powtarzalna dla tego typu taśm, gdyż w wynikach zaprezentowanych w rozdziale 4 zaobserwowano podobną tendencję.



Rysunek 5.23. Modele gęstości prądów $J_c(B, \theta)$ wykonane metodą MBP dla taśmy YBCO SuperOX w ujęciu 1D w programie MATLAB; a) model 2D, b) model 3D.

Stosując tą samą metodykę badawczą wykonano modele gęstości prądów krytycznych z wykorzystaniem MBP. Na Rys. 5.23a zaprezentowano wyniki symulacji dla modeli

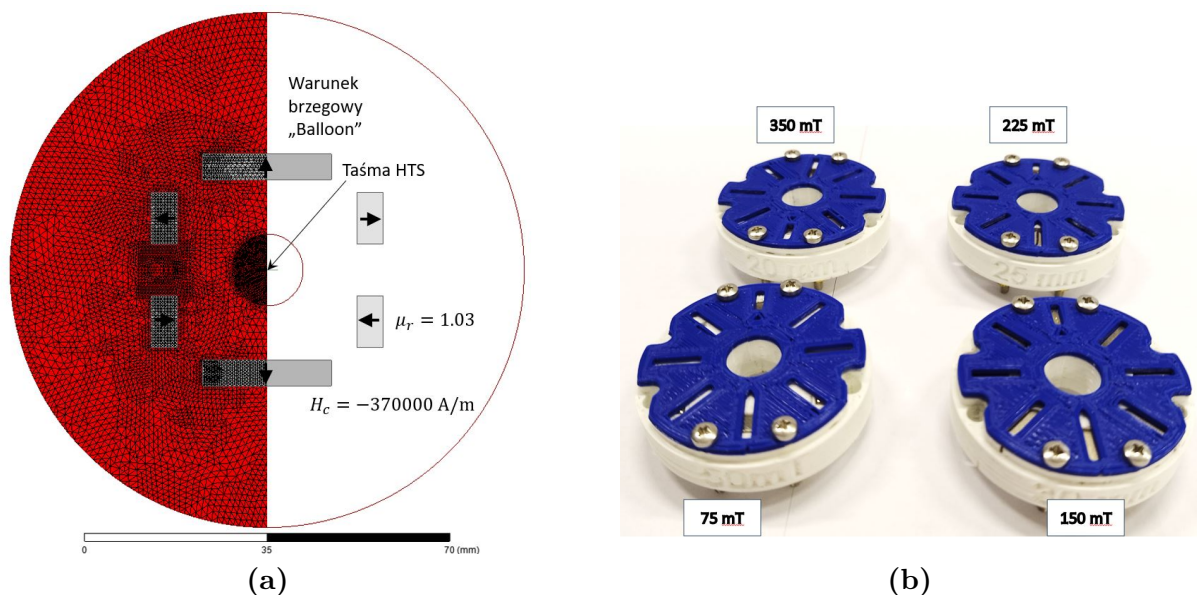
zależności kątowej gęstości prądu w taśmie HTS w ujęciu 1D. W odniesieniu do taśmy AMSC otrzymano zbliżoną maksymalną wartość J_c . Kształt zależności, jest od bardziej zbliżony do kształtu okręgu niż do kształtu eliptycznego. Dodatkowo w przedstawionym modelu 3D, na Rys. 5.23b widoczna jest duża stromość zależność gęstości prądu.

5.8. Wprowadzenie usprawnień mechanicznych

Konstrukcja stanowiska do charakteryzacji taśm HTS została zweryfikowana w trakcie badań próbnych. Na podstawie zidentyfikowanych problemów wprowadzono modyfikacje w konstrukcji poprawiające mocowanie próbki, zwiększające dokładność pomiarów oraz zwiększające rozdzielczość pomiarów pola.

Jednym z kluczowych wyzwań inżynierskich było skonstruowanie udoskonalonego mechanizmu nastawy kąta, który zapewnia wyższą rozdzielczość oraz mechaniczną stabilność* testowanej taśmy (HTS) w trakcie pomiarów. W tym celu wykorzystano przekładnię śrubową cechującą się większą dokładnością kątową. Dodatkowo wprowadzono modyfikację systemu łożysk z pozycji górnej na dolną. Zaprojektowano model stanowiska w taki sposób, aby był kompatybilny ze konstrukcją opisaną w poprzednich sekcjach pracy.

Rozmieszczenie magnesów zaplanowano z myślą o uzyskaniu określonej wartości pola magnetycznego w centralnej części układu, co jest kluczowe dla zapewnienia warunków badawczych zgodnych z założonymi wartościami indukcji magnetycznej; 75 mT, 150 mT, 225 mT oraz 350 mT. Uzyskanie takich wartości indukcji w obszarze badawczym wymagało wykorzystania narzędzi symulacyjnych (Rozdział 5.4.2), celem dobrania odległości między magnesami.

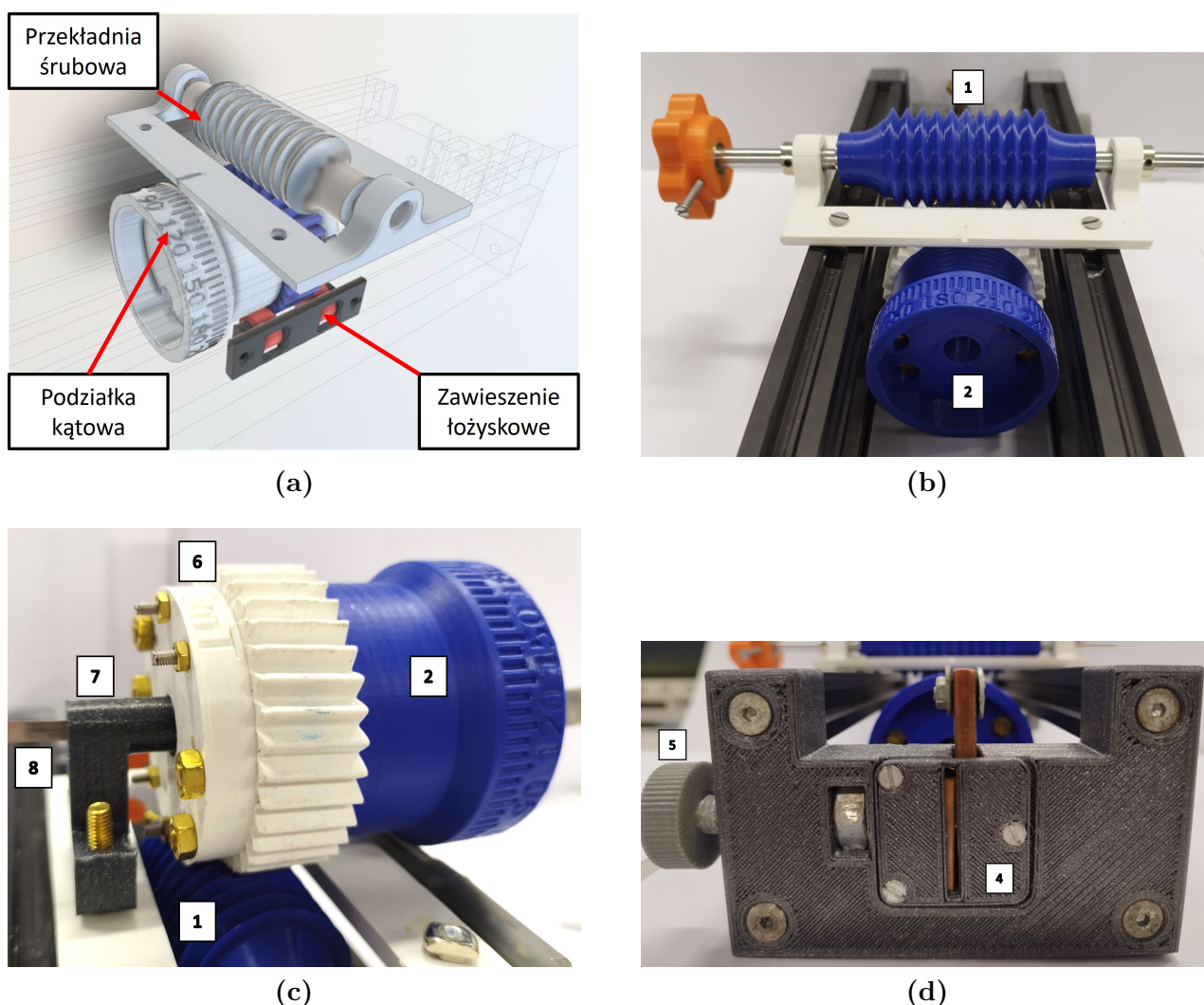


Rysunek 5.24. a) Model numeryczny w programie ANSYS układu magnesów, w którym uzyskano $B = 75 \text{ mT}$, b) fizyczna realizacja układów Halbacha wykorzystanych w dalszych badaniach.

Z uwagi na fakt, iż osiągnięcie wartości indukcji rzędu 75 mT było niemożliwe przy zastosowaniu konfiguracji magnesów sześciennych, zaproponowano wykorzystanie prostokątnych magnesów neodymowych. Na (Rys. 5.24a) zaprezentowano model wykorzystujący magnesy prostokątne wraz z siatką numeryczną wykonanej

w programie ANSYS. Po przeprowadzeniu symulacji oraz potwierdzeniu pomiarowym dla magnesów w temperaturze pokojowej wykonano cztery układy Halbacha (Rys. 5.24b).

Wykonano projekt oraz model 3D drugiej wersji stanowiska (Rys. 5.25a). Zastąpiono przekładnię zębatą, używaną w pierwszej wersji przekładnią ślimakową (1) cechującą się większą rozdzielczością kątową Rys. 5.25b. Zmieniono układ stabilizacji z łożysk umocowanych w górnej części na łożyska ślizgowe umocowane na dole konstrukcji. Dodatkowo zmieniono podziałkę kątową (2) i opracowano uchwyt (7) do taśm HTS (8) (Rys. 5.25c). Układy magnesów w strukturze Halbacha (6) zostały połączone z podziałką kątową (2) z wykorzystaniem śrub. Należy nadmienić, iż wykorzystane elementy metalowe wykonane są z aluminium lub miedzi tak, aby nie wprowadzać elementów magnetycznych oddziałujących z polem magnesów. Zastosowano również drugą wersję układu mocowania taśm (Rys. 5.25d), w której taśmę HTS (8) umieszczono pomiędzy dwoma płaskownikami (4) dociskając ją z wykorzystaniem śruby regulującej (5). Wprowadzenie wszystkich udoskołań doprowadziło do powstania nowej konstrukcji mechanicznej. Dzięki zastosowaniu technologii druku 3D możliwe było szybkie i niskobudżetowe wprowadzanie zmian na tym etapie projektu.



Rysunek 5.25. Zmodyfikowana wersja stanowiska badawczego a) model 3D koncepcji, b) przekładnia ślimakowa (1) wraz z nową podziałką (2), c) układ Halbacha (6) oraz układ stabilizacji taśmy (7), d) system mocowania próbki (4) wraz z układem docisku (5).

5.9. Półautomatyczny system pomiaru prądu krytycznego

Rozwiązania przemysłowe wykorzystujące charakteryzację taśm HTS mają zazwyczaj bardzo dobrze rozbudowane okłady pomiarowe, bazujące na dedykowanych systemach akwizycji danych np.: LabView [158, 166]. Systemy umożliwiają sterowanie źródłem prądu oraz kontrolę i wizualizację danych, ich agregację i zapis. Charakteryzacja taśm HTS z wykorzystaniem systemu LabView, dla badań porównawczych taśm HTS była realizowana przez autora w innych publikacjach, dlatego postanowiono zaprezentować inne rozwiązanie [22, 161] cechujące się większą mobilnością i nie wymagające systemów DAQ.

Zaproponowano rozwiązanie półautomatyczne, w którym zadawanie prądów transportu było realizowane manualnie, natomiast proces wyznaczania wartości krytycznych prądów dla konkretnych kątów θ był zautomatyzowany. System wykorzystywał kamerę internetową, wykorzystywaną w czasie pandemii. Widok z kamery w systemie półautomatycznym przedstawiono na Rys. 5.26.



Rysunek 5.26. Widok z kamery w systemie półautomatycznego pomiaru; 1) odczyt spadku napięcia, 2) odczyt prądu transportu.

Opisany system do pomiaru prądów krytycznych wykorzystywał kamerę internetową z systemem OCR (*Optical Character Recognition*), wykorzystywanym do zaawansowanego przetwarzania obrazów. Jego działanie można podzielić na kilka kluczowych etapów:

Konwersja na skalę szarości: Pierwszym krokiem jest zmiana obrazu z kolorowego na skalę szarości. Pozwala to zredukować trzy kanały kolorów (czerwony, zielony i niebieski) do jednego, co upraszcza dalsze przetwarzanie i zmniejsza złożoność danych. Każdy kanał koloru, który oryginalnie może przyjmować wartości $0C^\circ - 255C^\circ$, jest transformowany do jednego kanału szarości o takim samym zakresie.

Rozmycie obrazu: Kolejny krok polega na rozmyciu obrazu. Ma to na celu redukcję szumów. Rozmycie pomaga zminimalizować małe, nieistotne detale i zakłócenia, które mogłyby wpłynąć na dokładność wykrywania krawędzi i konturów.

Pogowanie (binarne): Następnie stosowane jest pogowanie binarne, które konwertuje obraz na postać tylko dwóch kolorów: czarnego i białego. Taki proces ułatwia identyfikację konturów, ponieważ każdy element na obrazie przyjmuje wartość 0 lub 255.

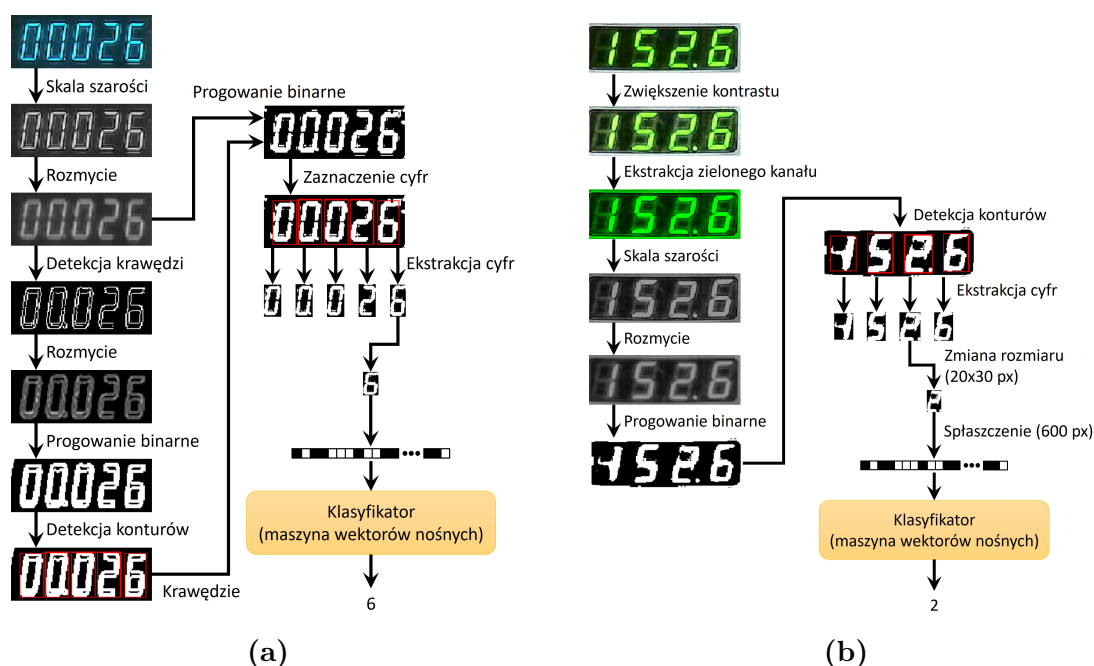
Analiza konturów: W zależności od rodzaju mierzonego urządzenia stosowane są różne techniki wykrywania konturów. Na przykład w woltomierzu, gdzie segmenty wyświetlacza są mniejsze i bardziej rozdzielone, stosuje się szereg operacji takich jak rozmycie, detekcja krawędzi, ponowne rozmycie i progowanie do wyizolowania poszczególnych cyfr.

Ekstrakcja i normalizacja cyfr: Po zidentyfikowaniu konturów, cyfry są ekstrahowane, normalizowane do wspólnego rozmiaru (20x30 pikseli) i przekształcane w jednowymiarową tablicę 600 wartości, co odpowiada wejściu przyjętemu przez klasyfikator.

Dodatkowa obróbka dla mierników prądu: W przypadku obrazów z miernika prądu, wyodrębnia się również zielony kanał, by lepiej uwidocznić prześwity i poświatę segmentów, co jest szczególnie pomocne przy wykrywaniu słabo widocznych cyfr, np. "1" z poziomą kreską.

System ten, wykorzystując zaawansowane techniki OCR i przetwarzania obrazu, umożliwia dokładne i efektywne odczytywanie wartości pokazywanych przez urządzenia pomiarowe, takie jak mierniki prądu, nawet w obecności zakłóceń wizualnych.

Podsumowując wykorzystanie półautomatycznego systemu pomiarowego zautomatyzowało proces wyznaczania prądów krytycznych. Opracowany program OCR bazujący na bezpośrednim zapisie mierzonych wartości i wyznaczaniu na ich podstawie w tym przypadku prądów krytycznych i wykładników potęgowych pozwolił na skrócenie czasu badań zachowując przy tym dokładność pomiarów mierników. Dodatkowo opracowany system może być wykorzystywany w innych aplikacjach.



Rysunek 5.27. Algorytmy odczytu i przetwarzania danych pomiarowych z wykorzystaniem OCR (a) pomiar spadku napięcia na taśmie, (b) pomiar prądu transportu.

5.10. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółową koncepcję oraz wykonanie prototypu stanowiska pomiarowego, które zostało zaprojektowane do przeprowadzania pomiarów prądów krytycznych w jednorodnym polu magnetycznym. Opisano kolejno poszczególne etapy projektu od wstępnej koncepcji, poprzez wybór materiałów, obliczenia techniczne, modelowanie MES, planowanie i konstruowanie stanowiska pomiarowego, aż po realizację eksperymentów porównawczych.

Zaprezentowano wyniki pomiarów zrealizowane dla dwóch taśm HTS 1G i 2G. Wyniki te porównano z parametrami taśm komercyjnie dostępnych, co pozwoliło na ocenę skuteczności przyjętej metody.

Wyniki pomiarów potwierdziły słuszność koncepcji w zakresie wykorzystania macierzy Halbacha jako źródła pola magnetycznego do charakteryzacji taśm HTS. Przeprowadzone badania wykazały, że na powierzchni taśmy HTS umieszczonej centralnie w obszarze badawczym występuje jednorodne pole magnetyczne, a jego wartość jest uzależniona od konfiguracji magnesów oraz odległości między nimi. Opracowane stanowisko pomiarowe umożliwia charakteryzację taśm HTS zgodnie z założeniami pracy.

Przeprowadzone badania weryfikacyjne umożliwiły zaobserwowanie problemów konstrukcyjnych i koncepcyjnych których wyeliminowanie było kluczowe do poprawy funkcjonalności stanowiska.

6

Charakteryzacja taśm HTS polu jednorodnym

Wyniki przeprowadzonej charakteryzacji taśm HTS zostały zaprezentowane w tym rozdziale. Charakteryzacja polegała na pomiarze zależności kątovej prądów krytycznych I_c dla różnych wartości zewnętrznego pola magnetycznego i różnego usytuowania taśmy względem kierunku pola. Wyniki posłużyły analizie porównawczej i oceny funkcjonalności zaproponowanego w pracy stanowiska pomiarowego.

Analizę porównawczą przeprowadzono dla czterech taśm dwóch producentów, (Rozdział 6.1). Zestawiono podstawowe parametry badanych taśm HTS. Rozdział 6.2 zawiera zbiorcze przedstawienie i omówienie wyników pomiarów zależności kątovej taśm HTS przeprowadzonej na zaprojektowanym stanowisku. Porównano zarówno prądy krytyczne jak i wykładniki potęgowe. Uzyskane wyniki stanowiły bazę do wykorzystania MBP 1D, co zostało zaprezentowane i opisane kolejnym rozdziale. (Rozdział 6.3). Rozdział zakończono w formie krótkiej dyskusji nad wynikami stanowiącej analizę porównawczą zrealizowanych badań oraz będącą odniesieniem wyników pomiarów do wyników pomiarów referencyjnych (Rozdział 6.4).

6.1. Wybór i przygotowanie próbek taśm HTS

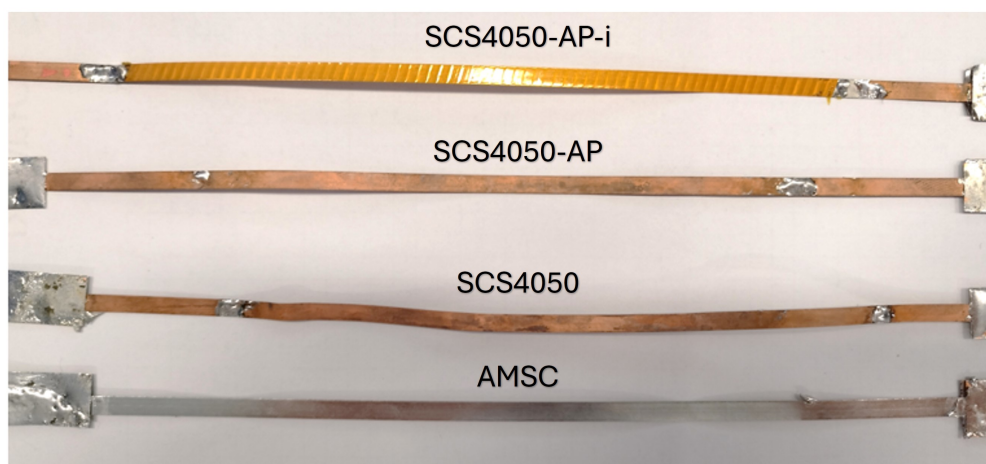
Badania porównawcze przeprowadzono zarówno dla taśm 1G jak i dla taśm 2G. Spośród dostępnych taśm wybrano następujące reprezentatywne próbki. Taśmy 1G produkcji AMSC o prądzie krytycznym $I_c = 150$ A celem porównania wyników z badaniami koncepcyjnymi. Trzy taśmy HTS 2G produkcji SuperPower, odpowiednio o oznaczeniu producenta SCS4050, SCS4050-AP (*Advanced Performance*), SCS4050-AP-i (*Advanced Performance-improved*). Taśmy SuperOx nie brano pod uwagę z uwagi jej uszkodzenie, które uniemożliwiło przeprowadzenie pomiarów porównawczych.

Wymienione taśmy są tej samej szerokości. Z uwagi na różne użyte techniki pinningu spodziewane są różnice w ich charakterystykach kątowych prądów krytycznych. Zestawienie badanych taśm HTS oraz wartości prądów krytycznych I_c zestawiono w Tabeli 6.1

Tabela 6.1. Zestawienie taśm HTS poddanym badaniom.

Nr	Producent	Oznaczenia producenta	Prąd krytyczny, A
1	Super Power	SCS4050-AP-i	120
2	Super Power	SCS4050-AP	99
3	Super Power	SCS4050	124
4	AMSC	BiSCCO	150

Przygotowano badane próbki taśm nadprzewodnikowych, każda o takiej samej długości oraz o identycznym rozstawie punktów pomiarowych. Zakończenie każdej z taśm przygotowano w celu zwiększenia powierzchni styku. Zastosowano miedziane okładziny, które powleczone zostały cyną. Pomiar spadku napięcia dokonywany był na długości 135 mm. Strefa oddziaływania pola magnetycznego to 10 mm odpowiadająca długości jednego magnesu.



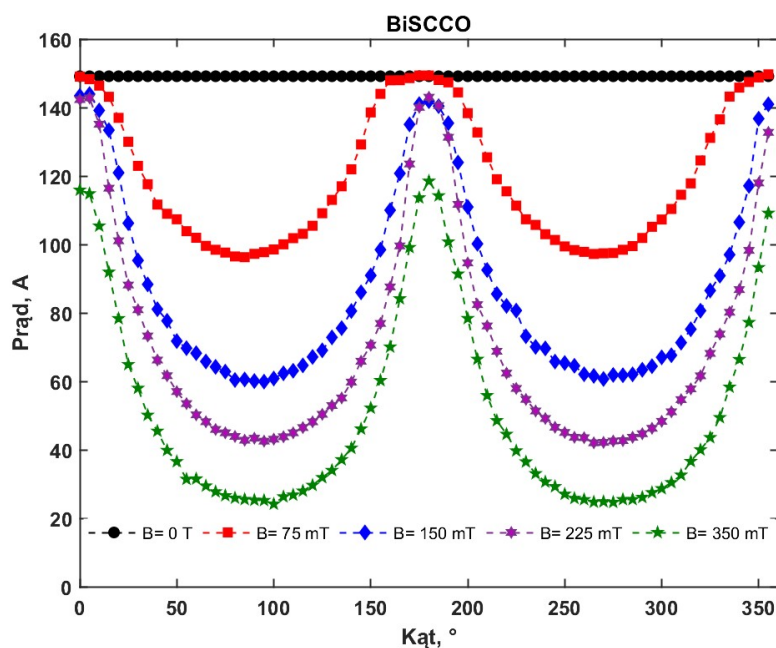
Rysunek 6.1. Zestawienie próbek taśm HTS: a) AMSC, b) SCS4050, c) SCS4050-AP, d) SCS4050-AP-i.

6.2. Pomiary zależności kątowej prądu krytycznego

Wyniki pomiarów zależności kątowej prądu krytycznego w taśmie 1G produkcji ASMC przedstawiono na Rys. 6.2. Charakterystyka ilustruje zależność prądu krytycznego I_c w funkcji kąta θ między kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego a osią taśmy nadprzewodnikowej.

Taśma 1G jest przykładem taśmy HTS, w której szczególnie uwidoczniony jest wpływ anizotropii materiału na wartości krytyczne prądu I_c . Do odwzorowania taśm 1G doskonale nadają się modele opisane w (Rozdziale 3.4), równaniem (3.1). Celem porównania wyników wykonanych na pierwszym stanowisku testowym (Rys. 5.20), dokonano pomiaru prądu na tej samej próbce taśmy.

Minima prądu krytycznego I_c przy kątach 90° oraz 270° i maksima przy 0° , 180° oraz 360° mogą być interpretowane przez pryzmat heterogeniczności mikrostrukturalnej materiału i jego interakcji z polami magnetycznymi. Zauważa się, że wartość prądu krytycznego I_c spada wraz ze wzrostem indukcji magnetycznej, co jest oczekiwanym efektem wynikającym z ograniczenia zdolności przenoszenia prądu w wyższych polach magnetycznych. Zauważalne ponadto jest to, iż stromość charakterystyki wzrasta wraz z wartością przyłożonego pola magnetycznego. W przypadku pomiaru prądów krytycznych dla pola o wartości 75 mT zaobserwowano wypłaszczenie w charakterystyce w przedziale $160^\circ - 190^\circ$.

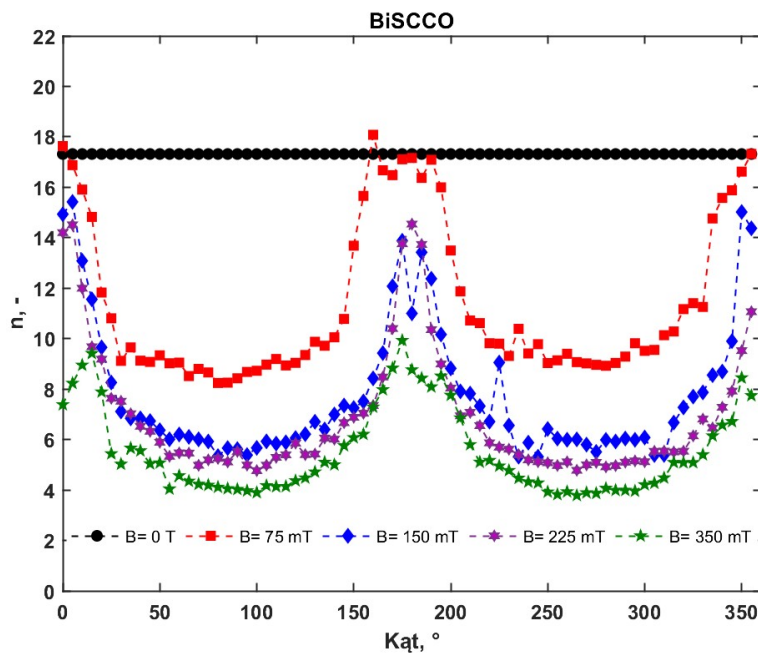


Rysunek 6.2. Wyniki pomiarów charakterystyki kątowej $I_c(B, \theta)$ taśmy AMSC, dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor czerwony, B_{III} - kolor niebieski, B_{IV} - kolor fioletowy, B_V - kolor zielony.

Znacząca redukcja zdolności przepływu prądu dla kątów 90° oraz 270° sięgająca kilkudziesięciu procent względem prądu dla pola prostopadłego jest istotnym ograniczeniem w aplikacjach dla tego rodzaju taśm. Odnosząc wyniki do wyników zaprezentowanych na Rys. 5.20 widoczne jest, iż zmierzone wartości są wyższe. Uzyskane wyniki z wykorzystaniem drugiej wersji stanowiska są bardziej zbliżone do teoretycznych. Z punktu widzenia redukcji wartości prądu krytycznego dla pola prostopadłego jest ona na poziomie 85%.

Na Rys. 6.3 zaprezentowano zależność wykładnika potęgowego n od kąta θ . Wykładnik ten jest miernikiem przepływu prądu przez taśmę i pozwala na ocenę homogeniczności oraz mechanizmów pinningu w nadprzewodniku. Wysokie wartości wykładnika n przy kątach 0° i 180° świadczą o silnym oddziaływaniu pinningu i stabilności przewodzenia prądu bez strat energii. Niskie wartości n przy 90° i 270° wskazują na zwiększony ruch wirów magnetycznych w materiale, co prowadzi do większych strat energetycznych.

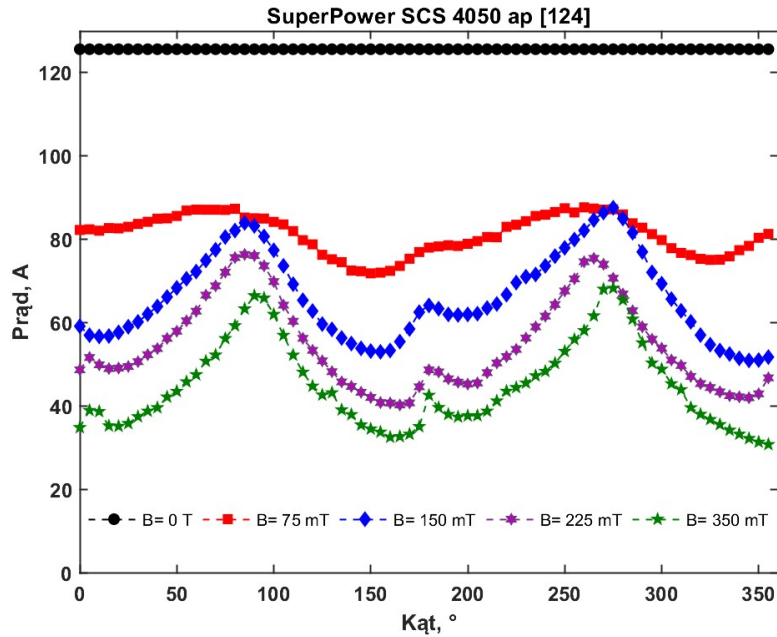
Zauważalna jest duża korelacja między rozkładem wartości prądów krytycznych a rozkładem wartości wykładników potęgowych. Co istotne, maksymalne wartości osiągalne dla taśmy pracującej w polu własnym sięgają $n = 17$ i maleją niemalże proporcjonalnie do wartości prądu krytycznego dla danego kąta.



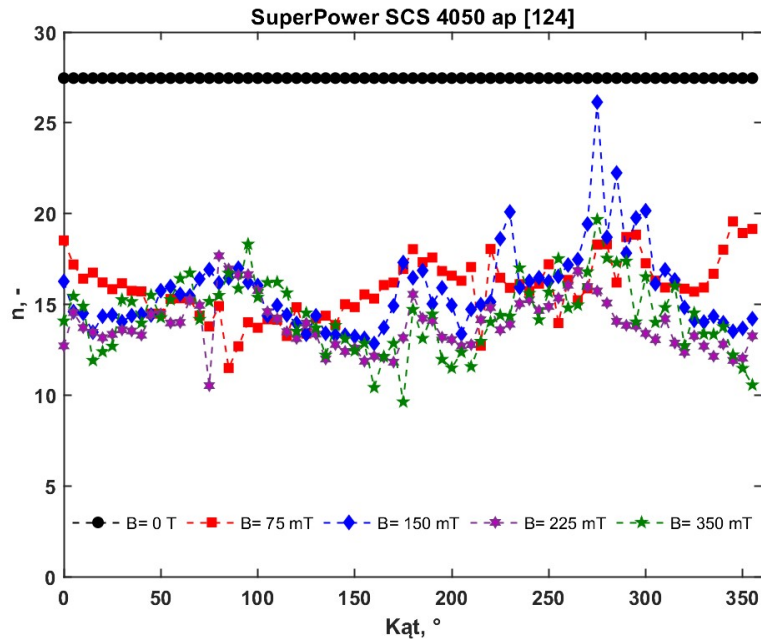
Rysunek 6.3. Wartość wykładnika potęgowego n taśmy AMSC, dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor czerwony, B_{III} - kolor niebieski, B_{IV} - kolor fioletowy, B_V - kolor zielony.

Kolejno zaprezentowano wyniki pomiarów zależności kątowej prądów krytycznych I_c dla taśmy SCS4050 produkcji SuperPower, w której nie zastosowano pinningu. Wyniki pomiarów dla pięciu wartości przyłożonego pola magnetycznego zaprezentowano na Rys. 6.4. Wartość katalogowa prądu krytycznego $I_c = 124$ A, co odpowiada wynikom pomiarów oznaczonych kolorem czarnym. W przypadku oddziaływania niskiego pola wynoszącego $B = 75$ mT zauważalna jest mała różnica między wartościami prądów krytycznych ok (10%). Różnica ta zwiększa się wraz ze wzrostem przyłożonego pola magnetycznego, osiągając maksymalnie kilkadziesiąt procent.

Ekstrema lokalne występują w okolicach tych samych wielkości kątowych, jak w przypadku pomiarów taśm 1G. Jest to typowe dla właściwości anizotropowych nadprzewodników drugiej generacji (2G HTS), gdzie orientacja taśmy względem pola ma istotny wpływ na wartość prądu krytycznego. Zauważalne jest delikatne przesunięcie kątowe wynoszące kilka stopni. W przedziale $170^\circ - 190^\circ$ obserwuje się powstanie trzeciego ekstremum lokalnego.



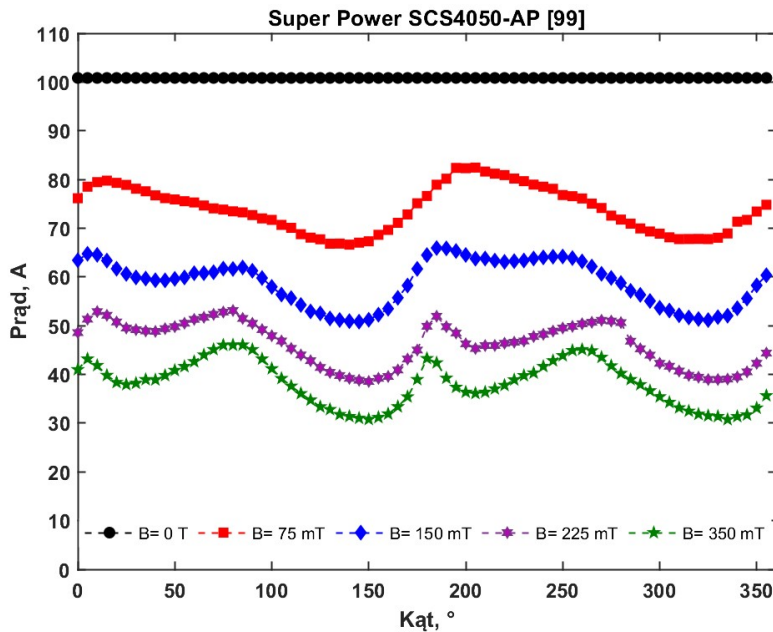
Rysunek 6.4. Wartość wykładnika potęgowego n taśmy SuperPower SCS4050, dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor czerwony, B_{III} - kolor niebieski, B_{IV} - kolor fioletowy, B_V - kolor zielony.



Rysunek 6.5. Wyznaczona wartość wykładnika potęgowego n SuperPower SCS4050, dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor czerwony, B_{III} - kolor niebieski, B_{IV} - kolor fioletowy, B_V - kolor zielony.

Na Rys. 6.5 przedstawiono zależność kątową wykładnika potęgowego podobnie jak dla taśmy ASMC. Wartości wykładnika potęgowego mieszczą się w granicach $n = 10 - 22$. W przypadku badań dla pola własnego wartości $n = 27$. Odwrotnie niż w przypadku badań taśm ASMC nie jest zauważalny wpływ wartości pola magnetycznego na wartość wykładników potęgowych, w szczególności dla niskiego pola magnetycznego $B = 75$ mT, w którym zaobserwowano odwrotną tendencję zmienności wykładnika, niż w pozostałych polach.

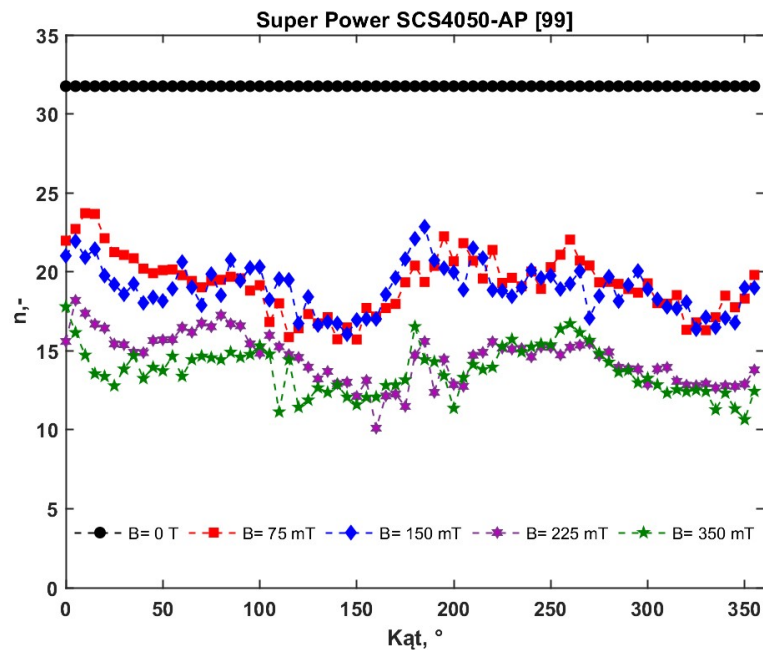
Kolejno zaprezentowano wyniki pomiarów dla taśmy HTS firmy SuperPower SCS 450-AP o prądzie krytycznym 99 A. W taśmach tych, zgodnie z oznaczeniem, wprowadzone zostały modyfikacje pozwalające na redukcję anizotropii właściwości materiału nadprzewodnikowego. Wyniki wyznaczenia prądu krytycznego $I_c(B, \theta)$ przedstawiono na Rys. 6.6. W odniesieniu do wyników zaprezentowanych na Rys. 6.4 zauważalna jest istotna redukcja różnicy między wartościami maksymalnymi, a minimalnymi. Spłaszczenie zależności prądów krytycznych jest cechą korzystną, gdyż można uwzględnić procentowy współczynnik korekcyjny. Szczególnie w przedziale $170^\circ - 190^\circ$ obserwuje się powstanie trzeciego ekstremum lokalnego, którego wartość w przypadku taśmy SCS 450-AP jest porównywalna z ekstremami występującymi przy kątach 90° oraz 270° . Dodatkowo, w przypadku pomiarów wykonanych dla pola 75 mT, ekstrema lokalne występują tylko dla kątów 0° oraz 180° .



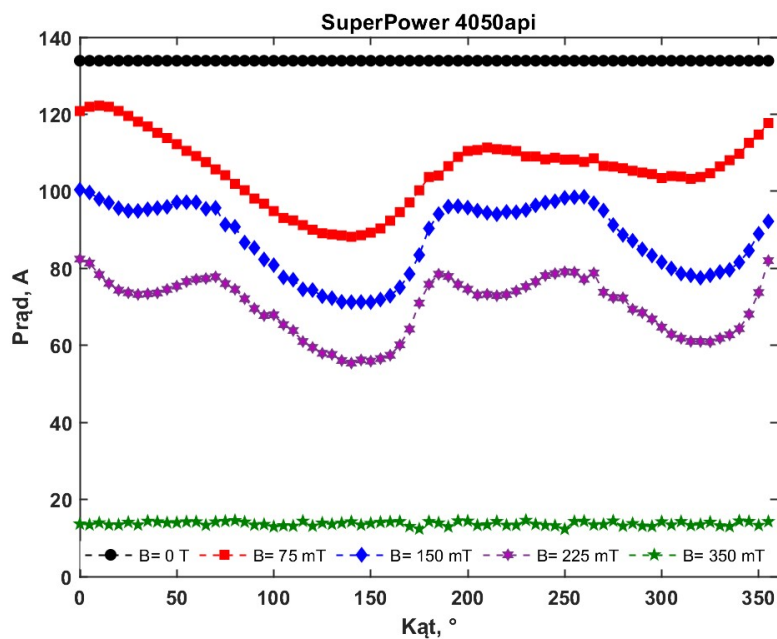
Rysunek 6.6. Wyznaczona wartość wykładnika potęgowego n taśmy SuperPower SPSCS4050-AP, dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor czerwony, B_{III} - kolor niebieski, B_{IV} - kolor fioletowy, B_V - kolor zielony.

Na Rys. 6.7 przedstawiono zależność kątową wykładnika potęgowego wyznaczonego dla taśmy SCS4050-AP. Wartości wykładnika są najwyższe przy kątach, gdzie taśma nadprzewodnikowa jest równoległa do kierunku zewnętrznego pola magnetycznego, i spadają przy kątach 90° i 270° . Również tutaj zaobserwować można, że wartości n spadają wraz ze wzrostem indukcji magnetycznej. W przypadku analizy bez oddziaływania pola zewnętrznego wartość wykładnika potęgowego n była stała i wynosiła około $n = 31$. Oddziaływanie pola magnetycznego wpływa jednoznacznie na zmniejszenie wartości wykładnika potęgowego,

który w zależności od wartości i orientacji pola magnetycznego przyjmuje wartości w zakresie $n = 11 - 24$.



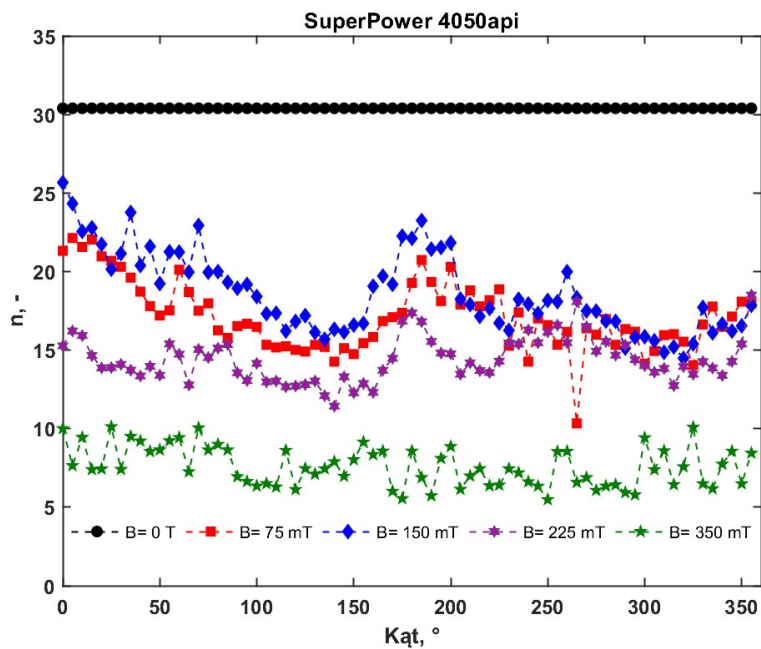
Rysunek 6.7. Wartość wykładnika potęgowego n taśmy SPSCS4050-AP, dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor czerwony, B_{III} - kolor niebieski, B_{IV} - kolor fioletowy, B_V - kolor zielony.



Rysunek 6.8. Wyznaczona wartość wykładnika potęgowego n taśmy SuperPower SPSCS4050-AP-I, dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor czerwony, B_{III} - kolor niebieski, B_{IV} - kolor fioletowy, B_V - kolor zielony.

Kolejną taśmą HTS, którą poddano charakteryzacji kątowej prądów krytycznych I_c oraz dla której określono wartość wykładnika potęgowego n , była taśma oznaczona jako SP4050AP – i. Symbol taśmy oznaczał lepsze właściwości w zakresie pinningu. Na Rys. 6.8 zaprezentowano wyniki pomiarów. Analiza wyników pomiarów, przeprowadzonych dla różnej wartości indukcji magnetycznej mniejszej niż 300 mT, wykazała, że są one porównywalne z danymi uzyskanymi dla wcześniej opisanych taśm. Jednakże przy wartości indukcji magnetycznej $B = 350$ mT zaobserwowano jednorodną wartość prądu krytycznego, która była niemal niezależna od kierunku przyłożonego pola magnetycznego. Ta właściwość jest szczególnie interesująca, gdyż stanowi odstępstwo od tendencji obserwowanych w analizowanych taśmach.

Wyniki pomiarów dla badanej taśmy przedstawiono na Rys. 6.8. Nietypowy przebieg wartości prądu krytycznego został zaznaczony kolorem zielonym. Analizując wartość wykładnika potęgowego n w odniesieniu do wyników pomiarów zaprezentowanych na Rys. 6.7 zauważalne jest utrzymanie stałej wartości dla pola własnego w przedziale $n = (11 - 25)$ dla większości przypadków oraz spadek wartości wykładnika potęgowego poniżej wartości $n = 10$ w przypadku pomiarów dla $B = 350$ mT.



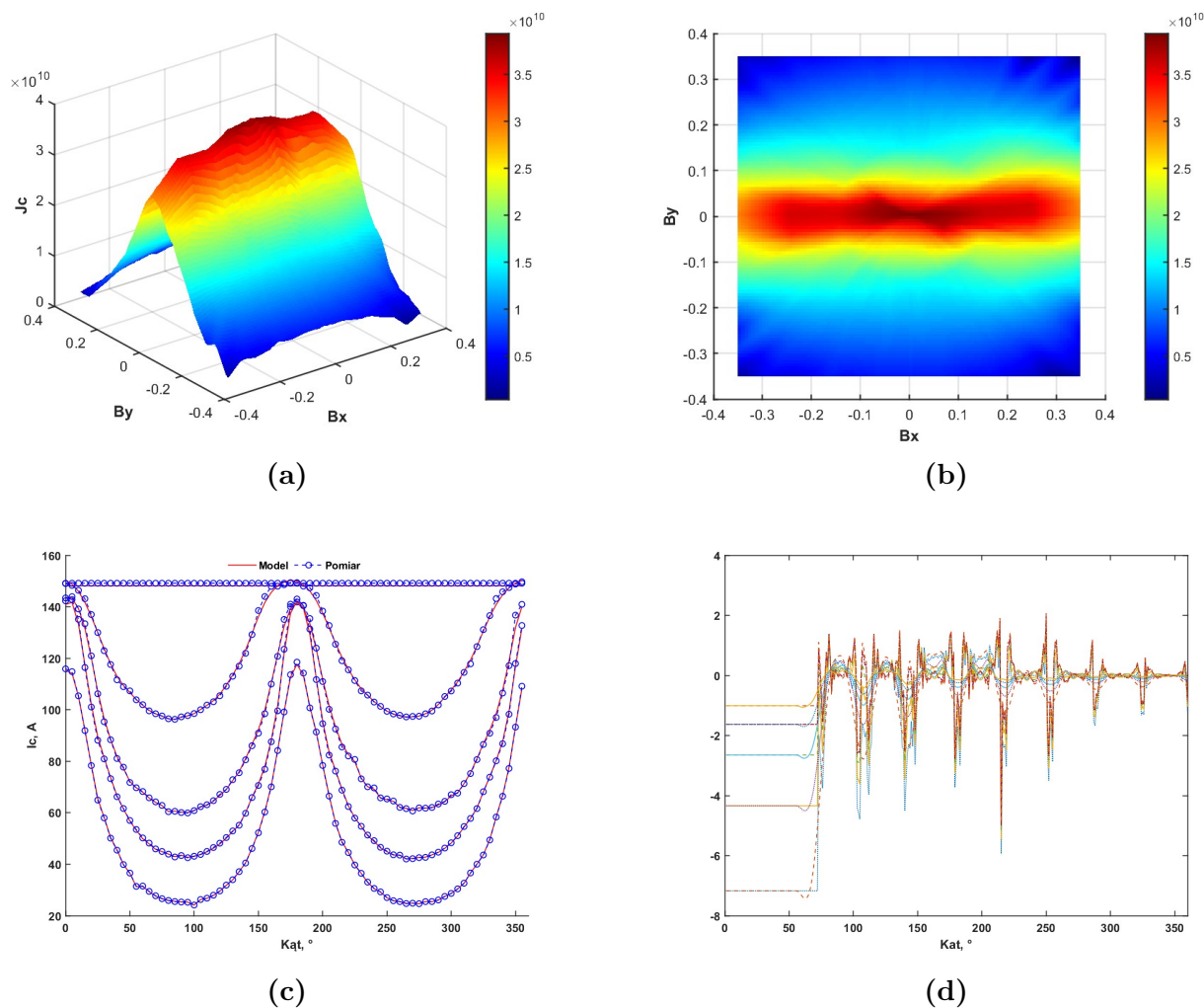
Rysunek 6.9. Wartość wykładnika potęgowego n taśmy SPSCS4050-AP-I, dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: dla pięciu różnych wartości pola magnetycznego: B_I - kolor czarny, B_{II} - kolor czerwony, B_{III} - kolor niebieski, B_{IV} - kolor fioletowy, B_V - kolor zielony.

Zaprezentowane powyżej wyniki pomiarów zależności kątowej taśm HTS posłużą jako dane wejściowe do analizy porównawczej przeprowadzonej w dalszej części pracy.

6.3. Modele gęstości prądów analizowanych taśm HTS

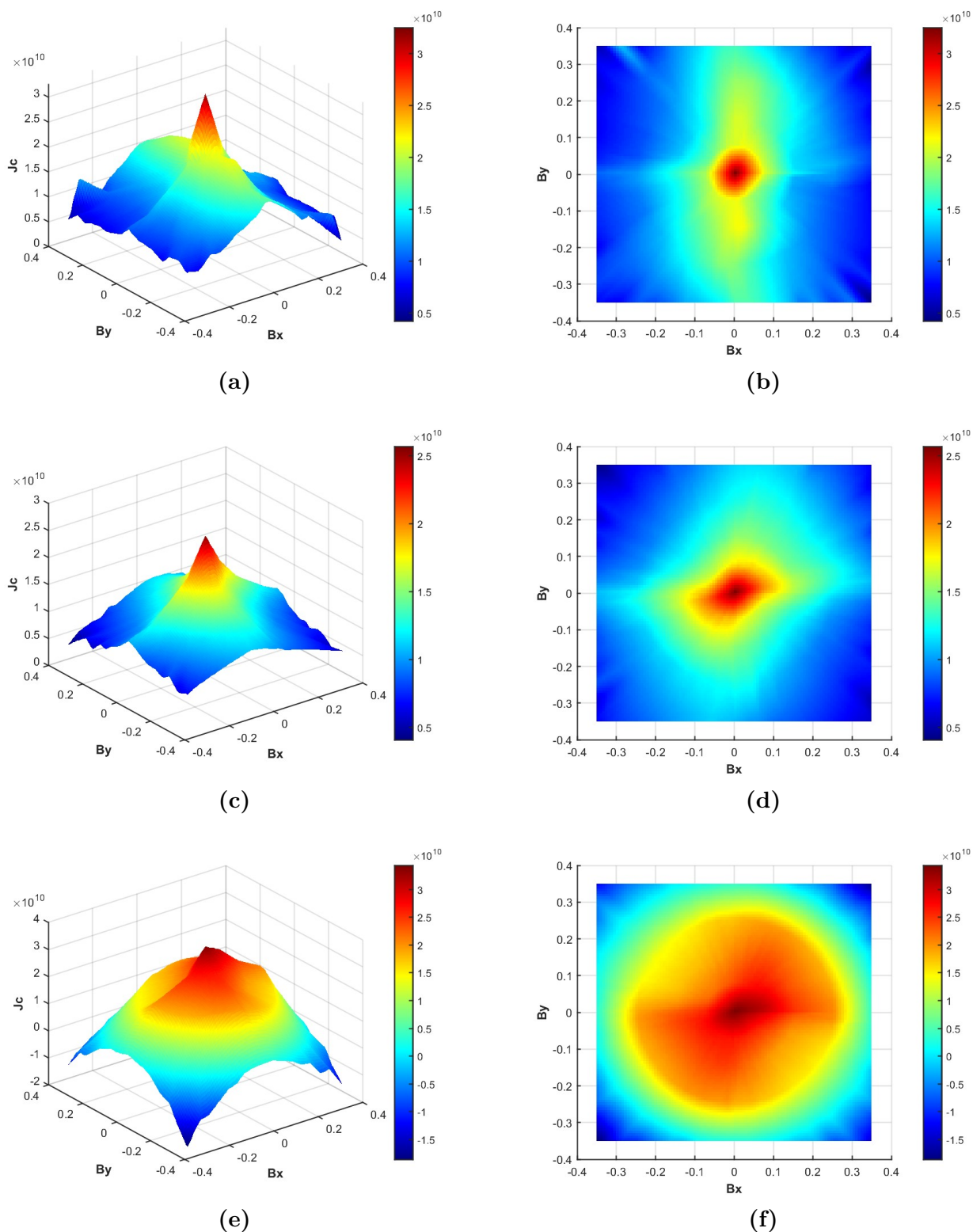
Wyniki pomiarów prądów krytycznych otrzymane drogą pomiarową w poprzednim podrozdziale, wykorzystane zostały do opracowania modeli numerycznych gęstości prądu krytycznych $J_c(B, \theta)$. Miało to na celu opracowanie własnej bazy danych modeli, która będzie wykorzystywana w przyszłych pracach symulacyjnych. Wykorzystano metodę MBP w ujęciu 1D do odwzorowania modeli (Rozdział 4.3). Na Rys. 6.10 zaprezentowano wyniki symulacji numerycznych w których wyodrębniono a) Model 3D zależności kątowej, b) model 2D zależności kątowej, c) wyniki dopasowania danych pomiarowych do modelu 1D, d) graficzną reprezentację kroków iteracji MBP.

Zaobserwowano wysoka gęstość krytyczną prądu praktycznie wzdłuż całej osi OX na poziomie 4×10^{10} A/mm², co związane jest z wypłaszczeniem charakterystyki w przedziale $160^\circ - 190^\circ$ dla niskich pól magnetycznych. Na podstawie badań teoretycznych wartości te w szczególności dla obszarów oddalonych od środka powinny zanikać. Wraz ze zwiększaniem się B_y . Wykorzystane dane pomiarowe są wystarczające do odtworzenia modeli, zastosowana MBP w dobrym stopniu odwzorowuje zjawiska zachodzące w taśmach 1G.



Rysunek 6.10. Wyniki działania metody bezparametrycznej dla danych taśm 1G ASMC (a) model 3D gęstości prądu $J_c(B)$, (b) gęstość prądu 2D $J_c(B)$, (c) dopasowanie modelu 1D do danych pomiarowych, (d) iteracje działania funkcji diff

W zakresie analizy porównawczej różnych typów taśm SuperPower zestawiono otrzymane modele 2D oraz 3D dla poszczególnych taśm: SCS4050, SCS4050-AP oraz SCS4050-AP-i. Modele odtworzone z wykorzystaniem MBP 1D przedstawiono na rysunku Rys. 6.11.

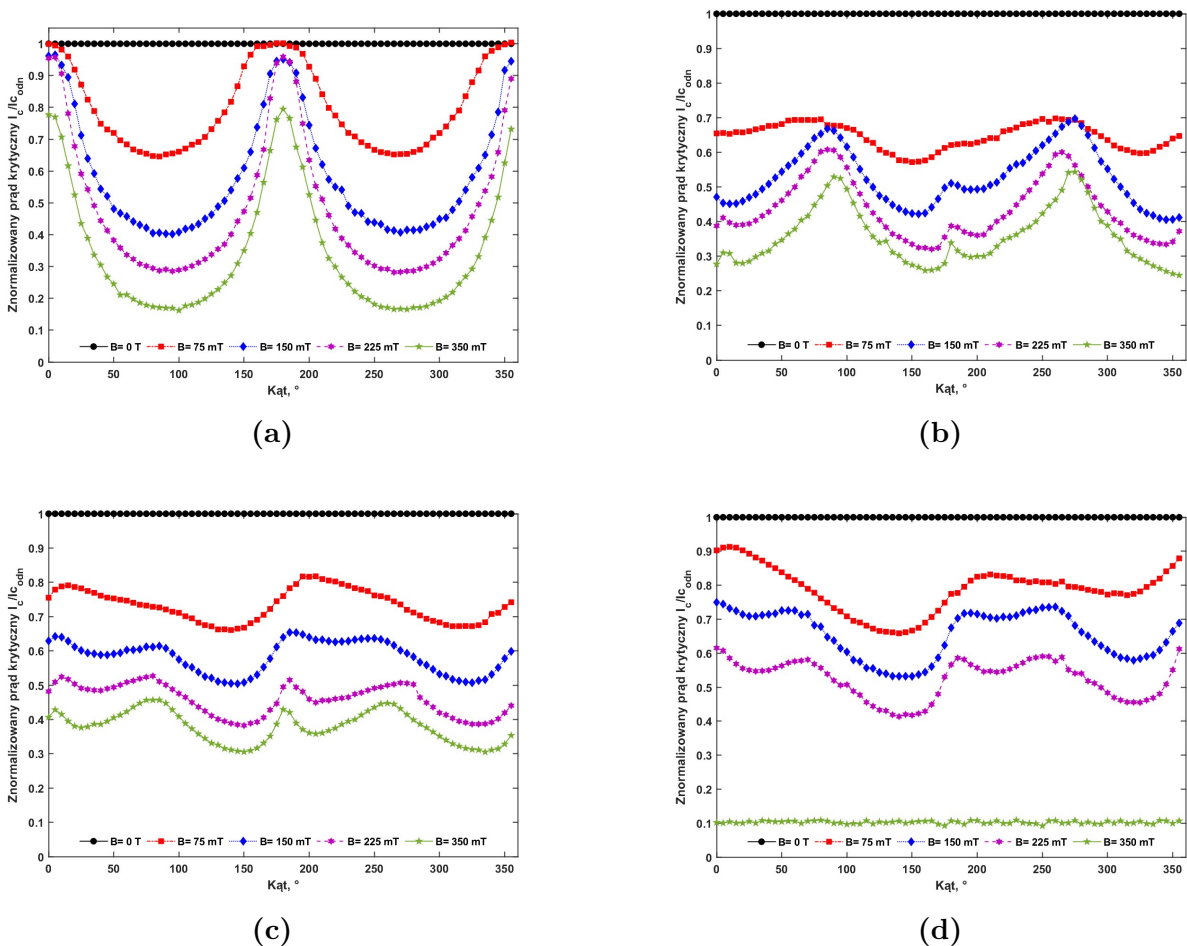


Rysunek 6.11. Modele 3D oraz 2D gęstości prądu taśmach HTS (a - b) Wyniki działania metody bezparametrycznej dla danych taśm 2G SCS4050 SuperPower SCS4050, (c - d) SCS4050-AP, (e - f) SCS4050-AP-i.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i analiz można wykazać, iż właściwy dobór taśm HTS do odpowiednich zastosowań powinien być potwierdzony wykonaniem modeli gęstości prądów lub znajomością charakterystyki kątowej prądów krytycznych. Model dla taśmy SCS4050 (Rys. 6.11a i Rys. 6.11b) jest najbardziej zbliżony do wykorzystywanego modelu Kia. Występuje w nim eliptyczna zależność gęstości prądów krytycznych rozciągnięta wzdłuż osi OY. Gęstość prądu w centrum taśmy osiąga wartości $3,5 \times 10^{10}$ A/m. Taki rodzaj charakterystyki wskazuje na wysoką podatność prądów krytycznych ze względu na przyłożone pole magnetyczne. Zastosowanie technik pinningu poprawia te właściwości, czego przykładem może być model dla taśmy SCS4050-AP (Rys. 6.11c i Rys. 6.11d). Pomijając mniejszą wartość gęstości prądu, bezpośrednio wynikającą z mniejszej wartości prądów krytycznych, w taśmach SCS4050-AP wartość prądu krytycznego jest bardziej jednorodna na charakterystyce kątowej. Minima lokalne są przesunięte w kierunku $\theta = 150^\circ$. W przypadku analizy taśmy YBCO SCS4050-AP-i wyniki symulacji przedstawiono na (Rys. 6.11e i Rys. 6.11f). Gęstość prądu w centrum taśmy osiąga wartości $3,5 \times 10^{10}$ A/m. Kształt charakterystyki zbliżony do owalu wykazuje bardzo mały współczynnik redukcji przy niskich polach magnetycznych, dlatego taśmy te idealnie nadają się do aplikacji takich jak kable elektroenergetyczne.

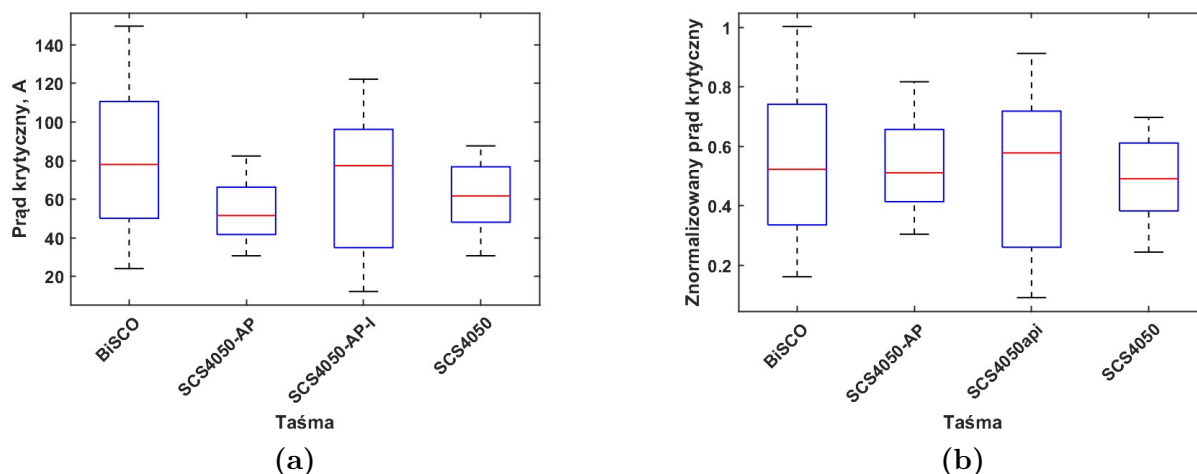
6.4. Dyskusja

Celem porównania poszczególnych taśm, w szczególności w zakresie redukcji prądów krytycznych, wyznaczono wartości prądów krytycznych jako wielkości względne w odniesieniu do wielkości występujących dla $B = 0$ mT. Na Rys. 6.12 zaprezentowano wartości znormalizowanego prądu krytycznego dla wszystkich badanych taśm HTS. Tego rodzaju porównanie umożliwia dokonanie wyboru taśmy dla konkretnej aplikacji. Jak wcześniej wspomniano, dobór taśmy został przeprowadzony z uwzględnieniem punktu optymalnej pracy urządzenia. W przypadku analizowanych taśm wpływ pola magnetycznego na redukcję prądów krytycznych jest cechą charakterystyczną każdej taśmy na Rys. 6.12a zaprezentowano wyniki dla taśm BiSCCO, która cechuje się bardzo dużym współczynnikiem redukcji sięgającym ponad 80% dla ustawienia prostopadłego względem linii sił pola magnetycznego. Niemniej jednak, największą redukcję, która była niezależna od kąta θ zaobserwowano dla taśmy SCS4050-AP-i (Rys. 6.12d). Co istotne, dla niższych wartości pola magnetycznego taśma ta cechowała się najlepszymi właściwościami w zakresie redukcji prądów krytycznych. Taśma SCS4050-AP (Rys. 6.12c) cechowała się największą równomiernością w zakresie prądów krytycznych w odniesieniu kątowym.



Rysunek 6.12. Znormalizowany prąd krytyczny dla taśm (a) BiSCCO , (b) SPSCS4050, (c) SPSCS4050-AP, (d) SPSCS4050-AP-I.

W celu przeanalizowania wyników pomiaru zaprezentowano wyniki w postaci wykresów skrzynkowych, na których zaznaczono prostokątem wartości pomiędzy pierwszym, a trzecim kwartylem, czerwona linią medianę oraz wartości maksymalne i minimalne w całym pomiarze. Na Rys. 6.13a przedstawiono wartości zmierzone, a na Rys. 6.13b wartości znormalizowane. Najmniejszą zmiennością cechuje się taśma SCS4050-AP, dla której mediana prądu krytycznego wynosi około 80 A. Tego rodzaju podejście daje tylko informacje poglądowe, których szczegółowo nie można wykorzystać do projektowania urządzeń, niemniej jednak na jego podstawie można porównać taśmy pod względem redukcji prądów krytycznych.



Rysunek 6.13. Wykresy skrzynkowe jako porównanie redukcji prądów krytycznych a) wartości zmierzone, b) wartości znormalizowane.

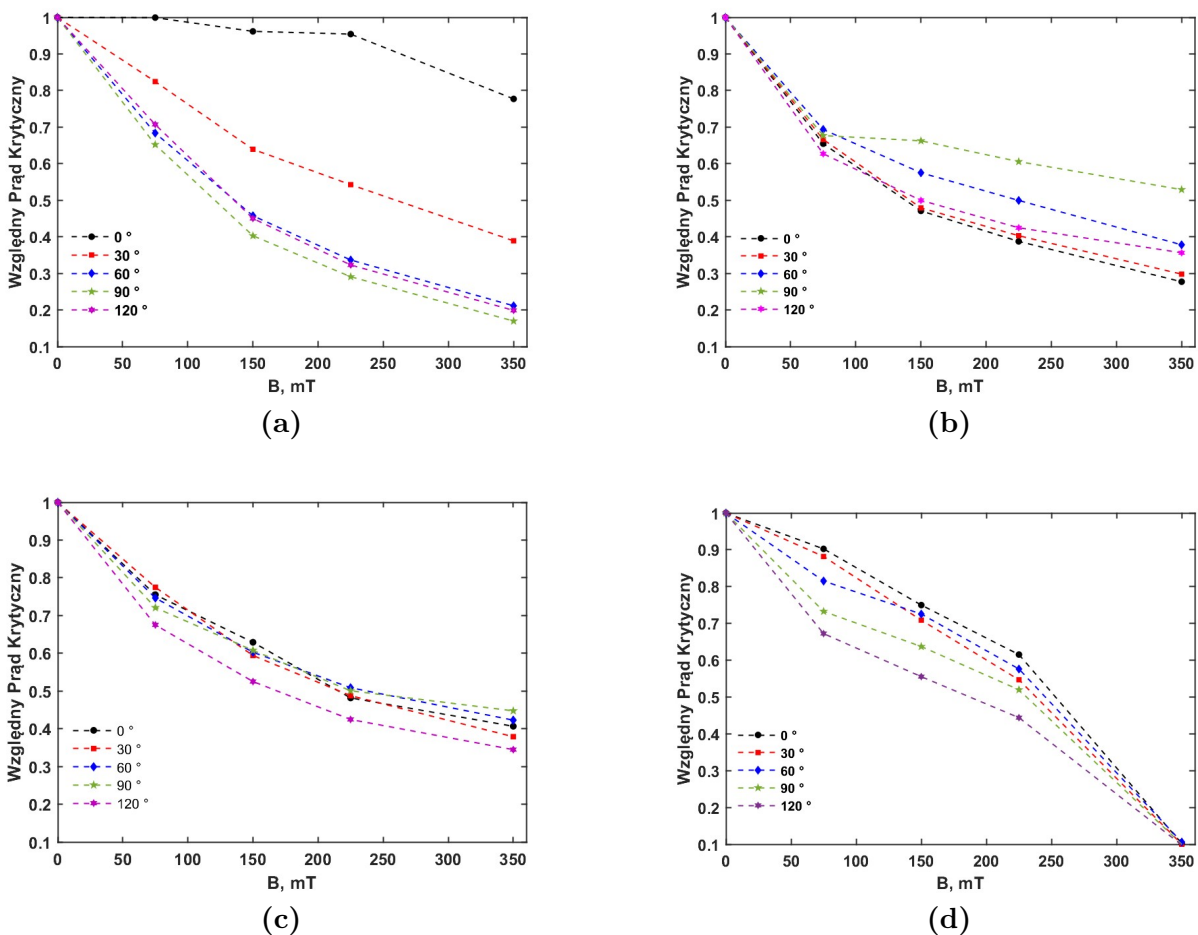
Każda z analizowanych taśm HTS cechowała się względną symetrią pomiędzy stronami taśmy, dzięki czemu możliwe było zawężenie analizy do 180° . Jest to dobra cecha, gdyż przy wykonywaniu urządzeń HTS na etapie montażu można pominąć kontrolę ułożenia taśmy. Urządzenia wykorzystujące przewody nawojowe w postaci taśm projektuje się na określony punkt pracy obejmujący założoną temperaturę pracy, zakres pola magnetycznego, czy też sposób ułożenia taśm w urządzeniu. Istnieje mała liczba urządzeń, w których oddziaływanie pola magnetycznego na taśmę HTS odnosi się do pełnych 360° . Dlatego też charakteryzacje taśm głównie wykonują, najczęściej producenci taśm laboratoryjne w celach pozyskania danych o produkcji. Biorąc pod uwagę symetrię taśmy wybrano kąty w zakresie od 0° do 120° z skokiem co 30° , dla których przeprowadzono analizę zmienności wartości krytycznej prądu może być zmienna w czasie.

Zakładając, że w otoczeniu taśmy HTS występuje jednorodne pole magnetyczne, w którym kierunek linii sił pola magnetycznego względem taśmy mieści się w zakresie 0° do 120° można przeprowadzić dobór taśm HTS na podstawie ich charakterystyk (Rys. 6.14). Charakterystyki pokazują zmienność prądu krytycznego wywołaną wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Charakterystyki odnoszą się kolejno do następujących taśm a) taśmy BiSCCO, b) taśmy SCS4050, c) taśmy SCS4050-AP, d) taśmy SCS4050-AP-I. Bazując na wynikach pomiarów można stwierdzić, iż w przypadku taśm 2G produkcji Super Power w obszarze do $B = 225$ mT najlepszymi właściwościami cechuje się taśma SCS4050-AP-I(d). Powyżej tej wartości następuje gwałtowny spadek wartości prądu krytycznego, który zredukowany zostaje do 10% wartości maksymalnej. Nieuwzględnienie takiego zjawiska na etapie projektowania taśmy może doprowadzić do przekroczenia punktu pracy, a tym samym

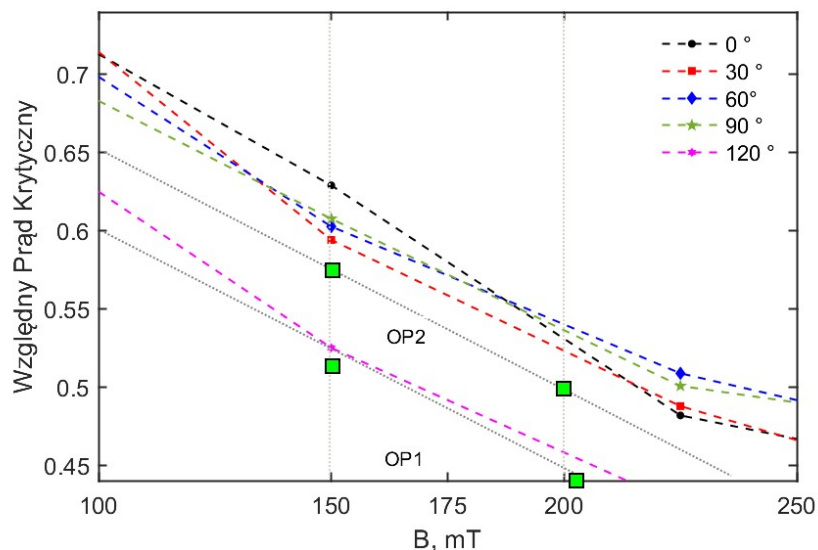
do uszkodzenia taśmy. Taśmy SuperPower, posiadają zbliżone charakterystyki $J_c(\theta)$. W przypadku aplikacji, w której występuje prostopadłe ułożenie taśmy względem linii sił pola najlepszymi właściwościami charakteryzuje się taśma SCS4050, dla której maksymalna redukcja prądu wynosi 42%.

Zakładając, że aplikacja, do której będą wykorzystywane analizowane taśmy HTS jest typową aplikacją cechującą się wartościami pola magnetycznego w przedziale od $B = 150$ mT do $B = 200$ mT przeprowadzono dobór optymalnego punktu pracy. W procesie doboru taśm wykorzystano dane (Rys. 6.14), w taki sposób, aby zminimalizować wpływ zależności kątowej na I_c .

Do analizy wybrano taśmę SCS4050-AP (c), dla której określono najlepsze warunki pracy. Na Rys. 6.14 przedstawiono proces doboru takich warunków pracy taśmy z wykorzystaniem charakterystyk kątowych. Dla przedstawionych założeń przedstawiono dwa podejścia wyboru punktu pracy. W pierwszym (OP1) założono, że wszystkie zakresy kątowe są brane pod uwagę (0° do 120°). Dla tego przypadku graniczne założenie to 45% I_c nie uwzględniając marginesu bezpieczeństwa (z jego uwzględnieniem realnie 40% I_c). Dla drugiego przypadku (OP2) (0° do 90°), można podwyższyć wykorzystanie taśmy do 50% I_c poprzez nadanie ograniczeń konstrukcyjnych w postaci możliwego ułożenia kątowego.

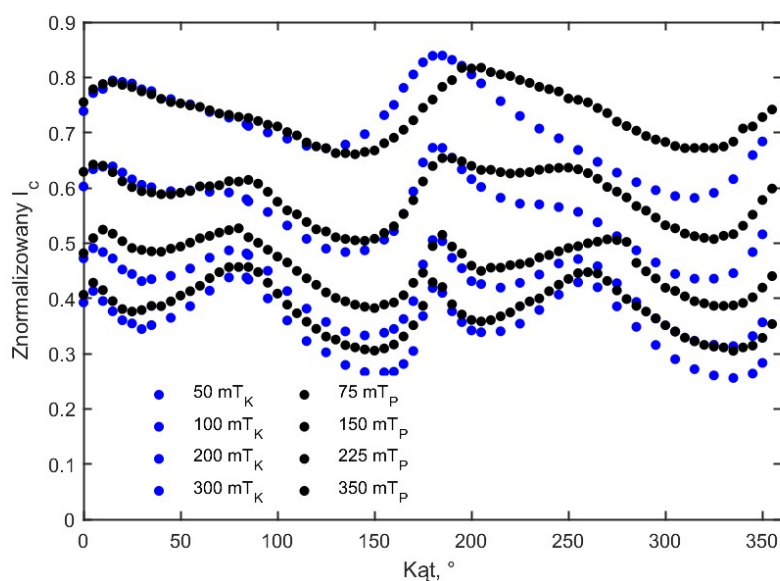


Rysunek 6.14. Redukcja prądu krytycznego w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego dla kątów w zakresie 0° do 120° dla taśm: a) BiSCCO, b) SCS4050, c) SCS4050-AP, d) SCS4050-AP-I.



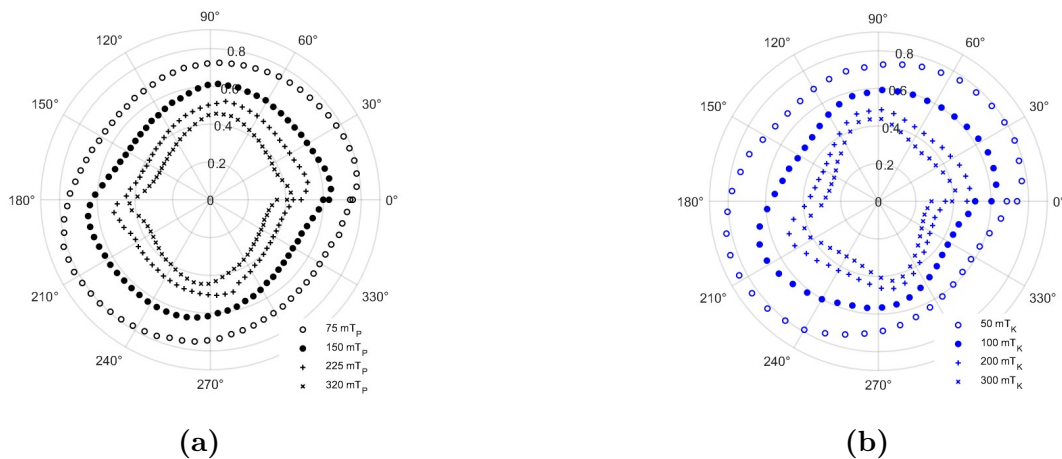
Rysunek 6.15. Sposób wyznaczania punktów pracy dla taśm HTS.

Zaprezentowane w ramach niniejszej pracy stanowisko do wyznaczenia prądów krytycznych w taśmach HTS wykorzystujących macierz Halbacha, zbudowany w oparciu o magnesy neodymowe, jest zgodnie z wiedzą autora nowatorskim podejściem do zagadnienia charakteryzacji taśm. Do tej pory nie było stosowane podobne rozwiązanie. Zwyczajowo wykorzystywano elektromagnesy, celem wytworzenia jednorodnego pola magnetycznego na powierzchni taśmy [158]. Dodatkowo badania prowadzono na relatywnie krótkich odcinkach, mniejszych niż 100 mm. W zautomatyzowanych systemach pomiar spadku napięcia dokonywany jest na taśmie, która całkowicie znajduje się pod wpływem pola zewnętrznego. W układzie Halbacha wykorzystano punktowe zadawanie pola na odległości 10 mm, a badania prowadzono na odcinku 135 mm.



Rysunek 6.16. Porównanie wyników prądów krytycznych w taśmie SCS4050-AP: układ Halbacha (kolor czarny), b) zautomatyzowany układ KIT (kolor niebieski) [158].

Celem porównania skuteczności przeprowadzonej charakteryzacji taśm z wykorzystaniem koncepcji zastosowania układu Halbacha zestawiono wyniki badań laboratoryjnych z wynikami otrzymanymi na stanowisku wykorzystującym elektromagnesy [158]. Badania dotyczyły taśmy SCS4050-AP. Na Rys. 6.16 zestawiono porównanie wyników pomiarów dla taśm. Kolorem czarnym zostały oznaczone taśmy badane z wykorzystaniem układu Halbacha, kolorem zielonym wyniki pomiarów opracowanych w [158]. W efekcie zestawienia można zauważyć, iż otrzymane wyniki są zbieżne jeśli chodzi o kształt charakterystyki. W przypadku niskich pól w zakresie kątowym 180° do 270° występuje niedopasowanie funkcji. Dodatkowo dla uzyskanych wyników, zbieżność występuje dla różnych wartości pól magnetycznych.



Rysunek 6.17. Porównanie wyników prądów krytycznych w taśmie SCS4050-AP na wykresie biegunowym: układ Halbacha (kolor czarny), b) zautomatyzowany układ KIT (kolor niebieski).

Zestawienie porównawcze wyników pomiarów oraz wyników zaczerpniętych z literatury na wykresie biegunowym (Rys. 6.17) ukazuje, że koncepcja zastosowania cylindrycznego układu Halbacha do charakteryzacji taśm i badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego jest słuszna. Zaprojektowane stanowisko umożliwia pełną charakteryzację taśm. Z wykorzystaniem opracowanej w niniejszej pracy koncepcji możliwe jest dokonywanie badań weryfikacyjnych taśm nadprzewodnikowych.

7

Podsumowanie

7.1. Podsumowanie badań

W pracy scharakteryzowano podstawowe właściwości taśm HTS oraz przedstawiono przykładowe rozwiązania komercyjne głównych producentów nadprzewodników. Zaproponowano matematyczny opis charakterystyki taśm, bazujący na prawie potęgowym oraz modelu Kima, do którego wprowadzono i przetestowano trzy modyfikacje. Przeprowadzono analizę nowych i istniejących modeli oraz ich dopasowania do danych pomiarowych.

Ważnym elementem pracy było zaproponowanie autorskiego rozwiązania konstrukcyjnego do badania taśm nadprzewodnikowych, bazującego na zewnętrznym polu magnetycznym wytworzonym przez magnesy trwałe w układzie Halbacha. Na etapie projektowania stanowiska przeprowadzono modelowanie pola magnetycznego wokół taśmy, bazując na modelach MATLAB i ANSYS. Potwierdzono jednorodność pola magnetycznego w obszarze, w którym umieszczona została badana próbka. Potwierdzenie to uzyskano poprzez wyniki symulacji oraz weryfikację pomiarową z wykorzystaniem czujników Halla i teslomierza.

Stanowisko zaprojektowano, wykorzystując technologię przyrostową druku 3D. Wykonano prototyp stanowiska oraz pomiary weryfikacyjne. Na ich podstawie wprowadzono korekty konstrukcyjne, w szczególności w zakresie ustawienia zadanych kątów tarczy z magnesami trwałymi, nazwanej koncentratorem pola. Dodatkowo wprowadzono automatyzację procesu wyznaczania prądów krytycznych poprzez zastosowanie programu bazującego na OCR.

Na zaprojektowanym stanowisku przeprowadzono serię pomiarów charakterystyki katowej taśm HTS dla wybranych czterech próbek taśm. Wyniki pomiarów porównano z wynikami teoretycznymi, a jedną taśmę odniesiono do wyników z innej bazy danych.

Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność opracowanego stanowiska do charakterystyki taśm HTS, co w pełni potwierdziło postawioną w pracy tezę.

7.2. Wnioski

Przeprowadzone rozważania teoretyczne i analizy numeryczne oraz wyniki badań eksperymentalnych zamieszczone w rozprawie, jak również działania projektowo-konstrukcyjne, pozwalają na sformułowanie wniosków i uwag o charakterze szczegółowym, które zestawiono poniżej:

- Cel pracy został osiągnięty. Opracowano urządzenie pomiarowe służące do charakteryzacji taśm HTS w polach słabych do 0,5 T. Urządzeniu umożliwiała wykonanie pomiarów charakterystyki $J_c(B, \theta)$ dla wybranych wartości indukcji: $B = 75\text{mT}$; $B = 150\text{mT}$; $B = 225\text{mT}$; $B = 350\text{mT}$. Urządzenie zapewnia stabilność pomiarów oraz powtarzalność, co umożliwia szerokie zastosowanie;
- Wyniki pomiarów porównawczych taśm HTS wskazują na znaczącą redukcję wartości prądów krytycznych w funkcji wartości zewnętrznego pola magnetycznego. Średnie wartości redukcji dla poszczególnych taśm mieszczą się w zakresie 0,4-06 I_c , co należy uwzględnić przy doborze punktu pracy taśmy HTS ;
- Modele opisujące zależność kątową prądów krytycznych (KL, MAA, PER) w przypadku taśm 2G cechują się dużą rozbieżnością względem pomiarów. Spośród zaproponowanych modeli (KTH, KCH, KCP) model bazujący na tangensie hiperbolicznym okazał się porównywanie dobry z modelami KL i MAA;
- Potwierdzono użyteczność metody bezparametrycznej do odtwarzania parametrów niedostępnych pomiarowo, takich jak gęstość prądu krytycznego taśm HTS J_c . Zaprezentowana metoda 1D umożliwia odwzorowanie zależności z uwzględnieniem wpływu pola własnego. Modele w łatwy sposób można wykorzystać w symulacjach numerycznych- niestety model jest ograniczony tylko do jednej taśmy;
- Przeprowadzone badania symulacyjne oraz weryfikacja pomiarowa potwierdziła możliwość wykorzystania magnezów neodymowych w układzie Halbacha do generowania jednorodnego pola magnetycznego. Tematyka oddziaływań wzajemnych pomiędzy magnezem neodymowy taśmą HTS może stanowić podstawę do badań materiałowych. Zaobserwowano zmianę właściwości magnezów w funkcji temperatury;
- Potwierdzono możliwość wykorzystania systemu akwizycji danych opartego o autorskim systemem bazującym na OCR. Podejście to pokazało, iż w przypadku braku systemów DAQ możliwe jest wprowadzenie automatyzacji procesu wyznaczania wartości prądów krytycznych a bazując tylko na wyświetlanych wartościach mierzonych;
- Potwierdzono możliwość i użyteczność stosowania technologii przyrostowej druku 3D w zastosowalnych kriogenicznych, Należałoby przeprowadzić badania materiałowe pod względem dobór materiału, który jest odporny na zmiany temperatury. Zaobserwowano, że po przeprowadzeniu serii pomiarowej materiał PLA stawał się kruchy i uszkadzał się.

7.3. Kluczowe osiągnięcia

Podsumowując wyniki badań przeprowadzonych w niniejszej rozprawie i mając na uwadze podsumowanie efektów zrealizowanych prac zestawiono siedem kluczowych osiągnięć autora, do których można zaliczyć:

- Opracowanie dwóch wersji stanowiska pomiarowego do charakteryzacji taśm HTS w jednorodnym polu magnetycznym, wykonanego w oparciu o druk 3D, umożliwiających pomiary w zakresie wartości indukcji od $B = 75mT$ do $B = 350mT$;
- Współudział w opracowanie metody bezparametrycznej MBP wykorzystywanej do analizy gęstości prądów krytycznych taśm HTS oraz wykorzystanie metody w ujęciu 1D celem zbudowania własnej bazy danych;
- Opracowanie modelu numerycznego magnetostatycznej analizy w ANSYS oraz wykonanie stanowiska badawczego do pomiaru indukcji magnetycznej magnesów trwałych w układzie Halbacha;
- Przeprowadzenie pomiarów prądów krytycznych w jednorodnym polu magnetycznym z użyciem układu Halbacha zbudowanego z magnesów neodymowych oraz zestawienie wyników pomiarów z wynikami z innych systemów;
- Przeprowadzenie badań porównawczych czterech taśm na zaprojektowanym stanowisku w celu określenia charakterystyk użytecznych do wyboru punktu pracy taśmy;
- Opracowanie systemu akwizycji danych pomiarowych napięć i prądów krytycznych taśm HTS bazującego na OCR, stanowiącego alternatywę do systemów DAQ opartych o LabView;
- Opracowanie i przetestowanie trzech modeli numerycznych zależności kątowej *Kim-tanh* (**KTH**) (3.4), *Kim-cosh* (**KCH**) (3.5) oraz *Kim-cosh-power* (**KCP**) (3.6) jako alternatywy do modelu **KL** (*Kim-like Model*);

7.4. Potencjał przyszłych prac badawczych

Przedstawiona koncepcja stanowiska badawczego do charakteryzacji taśm HTS może z powodzeniem być podstawą dla dalszych badań. W ramach dalszych prac naukowych planowane jest skalowanie stanowiska tak, aby możliwe było osiągnięcie wartości pola magnetycznego do 1T. Dodatkowo planowana jest pełna automatyzacja stanowiska pomiarowego w ramach której wykonany zostanie system akwizycji danych pomiarowych bazujący na dotychczasowych systemach wraz z układem sterowania silnikiem krokowym zapewniającym regulację położenia. Poza zmianami konstrukcyjnymi planowane jest wykonanie serii stanowisk testowych w celach popularyzacji rozwiązania.

Opracowana bazę zależności kątowej składającą się z czterech taśm w przyszłości planuje się rozszerzyć o kolejne próbki taśm, tak aby na ich podstawie opracować otwarte narzędzie umożliwiające dobór taśm na podstawie podania punktu pracy urządzenia.

Wyniki zależności kątowej będą wykorzystywane w symulacjach numerycznych urządzeń nadprzewodnikowych. W najbliższym czasie planowane jest wykorzystanie analizy porównawczej tam HTS w procesie projektowania cewek nadprzewodnikowych do przesyłu bezprzewodowego.

Zależności prądów krytycznych w ramach prac przedstawionych w niniejszej pracy zostały opisane przy wymuszeniach prądem stałym DC. W ramach prac rozwojowy planowane jest wykorzystanie innych przebiegów prądu transportu oraz rozszerzenie analizy o analizę strat zmiennoprądowych AC. Wszystkie powyżej wymienione przykłady wskazują na duży potencjał badawczy zagadnień związanych z badaniem taśm nadprzewodnikowych i ich układów w szczególności w wykorzystaniu w nowoczesnych urządzeniach elektroenergetycznych.

Bibliografia

- [1] K. W. Vugrin, L. P. Swiler, R. M. Roberts, N. J. Stucky-Mack, and S. P. Sullivan, “Confidence region estimation techniques for nonlinear regression in groundwater flow: Three case studies,” *Water Resources Research*, vol. 43, no. 3, 2007.
- [2] B. Lux and B. Pfluger, “A supply curve of electricity-based hydrogen in a decarbonized european energy system in 2050,” *Applied Energy*, vol. 269, p. 115011, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115011.
- [3] P. Tixador, “Development of superconducting power devices in europe,” *Physica C-superconductivity and Its Applications*, vol. 470, pp. 971–979, 2010, doi: 10.1016/J.PHYSC.2010.05.014.
- [4] H. Stryczewska, M. Stepien, and O. Boiko, “Plasma and superconductivity for the sustainable development of energy and the environment,” *Energies*, 2022, doi: 10.3390/en15114092.
- [5] A. Morandi, M. Breschi, P. Ribani, M. Fabbri, and Limsa, “Superconducting magnetic energy storage,” *Energy Storage for Power Systems*, 2020, doi: 10.1049/pbpo063e.
- [6] J. Hull, “Applications of high-temperature superconductors in power technology,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 66, pp. 1865–1886, 2003, doi: 10.1088/0034-4885/66/11/R01.
- [7] C. Yao and Y. Ma, “Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications,” *iScience*, vol. 24, 2021, doi: 10.1016/j.isci.2021.102541.
- [8] K. Ilieva and O. Dinolov, “State-of-the-art of superconducting materials and their energy-efficiency applications,” *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1109/EEAE49144.2020.9279004.
- [9] B. G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini, and H. Ohsaki, “High-temperature superconductivity: A roadmap for electric power sector applications, 2015–2030,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1109/TASC.2017.2671680.
- [10] A. Narlikar, *Frontiers in Magnetic Materials*. Springer, 2005.
- [11] C. Rey, *Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications*. Woodhead Publishing Series in Energy, Elsevier Science, 2015.

- [12] M. Philippe, M. D. Ainslie, L. Wera, J.-F. Fagnard, A. Dennis, Y. Shi, D. A. Cardwell, B. Vanderheyden, and P. Vanderbemden, "Influence of soft ferromagnetic sections on the magnetic flux density profile of a large grain, bulk y - ba - cu - o superconductor," *Superconductor Science and Technology*, vol. 28, no. 9, p. 095008, 2015.
- [13] V. M. Zermeno, A. B. Abrahamsen, N. Mijatovic, B. B. Jensen, and M. P. Sørensen, "Calculation of alternating current losses in stacks and coils made of second generation high temperature superconducting tapes for large scale applications," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, no. 17, 2013.
- [14] Z. Hong, A. Campbell, and T. Coombs, "Numerical solution of critical state in superconductivity by finite element software," *Superconductor Science and Technology*, vol. 19, no. 12, p. 1246, 2006.
- [15] R. Brambilla, F. Grilli, L. Martini, and F. Sirois, "Integral equations for the current density in thin conductors and their solution by the finite-element method," *Superconductor Science and Technology*, vol. 21, no. 10, p. 105008, 2008.
- [16] V. M. R. Zermeño, K. Habelok, M. Stepień, and F. Grilli, "A parameter-free method to extract the superconductor's $j_c(b,)$ field-dependence from in-field current-voltage characteristics of high temperature superconductor tapes," *Superconductor Science and Technology*, vol. 30, p. 034001, jan 2017, doi: 10.1088/1361-6668/30/3/034001, [Online] <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6668/30/3/034001>.
- [17] M. Stepien, S. Krosny, and B. Grzesik, "Analysis of quench propagation using coupled electrical-thermal fem model," *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, doi: 10.1088/1742-6596/234/2/022036.
- [18] B. Grzesik, M. Stepien, and R. Jez, "Toroidal hts transformer with cold magnetic core – analysis with fem software," *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, doi: 10.1088/1742-6596/234/3/032018.
- [19] P. Lasek, J. Michalak, and M. Stepien, "Critical current of hts 2g tape operating under high-frequency triangular wave current with dc bias," pp. 1–4, 2019.
- [20] K. Berger, J. Kapek, A. Colle, M. Stepien, B. Grzesik, T. Lubin, and J. Lévêque, "3-d modeling of coils for pulsed field magnetization of hts bulk pellets in an electrical machine," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1–5, 2018.
- [21] P. Lasek, J. Michalak, and M. Stepien, "Critical current of hts 2g tape operating under high-frequency triangular wave current with dc bias," pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/PEE.2019.8923527.
- [22] K. Habelok, P. Lasek, and M. Stepien, "Characterization the critical current in hts tape placed between halbach arrays," pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/ELMECO.2017.8267762.
- [23] A. Arsenault, F. Sirois, and F. Grilli, "Efficient modeling of high-temperature superconductors surrounded by magnetic components using a reduced h - ϕ formulation," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3073274.

- [24] G. G. Sotelo, M. Carrera, J. Lopez-Lopez, and X. Granados, “H-formulation fem modeling of the current distribution in 2g hts tapes and its experimental validation using hall probe mapping,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 8, pp. 1–10, 2016.
- [25] R. Brambilla, F. Grilli, L. Martini, M. Bocchi, and G. Angeli, “A Finite-Element Method Framework for Modeling Rotating Machines with Superconducting Windings,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 5, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1109/TASC.2018.2812884.
- [26] M. Zhang, W. Yuan, J. Kvitkovic, and S. Pamidi, “Total AC loss study of 2G HTS coils for fully HTS machine applications,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 28, no. 11, p. 115011, 2015, doi: 10.1088/0953-2048/28/11/115011, [Online] <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/28/11/115011>.
- [27] P. W. Anderson, “Theory of flux creep in hard superconductors,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 9, pp. 309–311, Oct 1962, doi: 10.1103/PhysRevLett.9.309, [Online] <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.9.309>.
- [28] H. Onnes, *The Discovery of Superconductivity: 1910-1914*. 1911.
- [29] S. Sarangi, S. Chockalingam, R. Mavinkurve, and S. Bhat, “Experimental evidence for zero dc resistance of superconductors,” 07 2005.
- [30] W. Meissner and R. Ochsenfeld, “Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit,” *Die Naturwissenschaften*, vol. 21, p. 787, 1933.
- [31] F. London, *Superfluids: Macroscopic theory of superconductivity*. Structure of matter series, Wiley, 1950.
- [32] K. Tang, K. Hoffmann, and Q. Tang, *Ginzburg-Landau Phase Transition Theory and Superconductivity*. International Series of Numerical Mathematics, Springer Basel AG, 2001.
- [33] J. Schrieffer, *Theory Of Superconductivity*. Advanced Books Classics, Avalon Publishing, 1999.
- [34] K. Muller and J. Bednorz, “The discovery of high-temperature superconductivity (reprinted),” *La Recherche*, pp. 88–90, 05 2000.
- [35] J. Skakle, “Cationic and anionic substitutions, crystal chemical substitutions, magnetic lanthanides, properties of ybco, superconductivity,” *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 23, pp. 1–40, 1998.
- [36] Y. Wang, *Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering*. Wiley, 2013.
- [37] X. Zhao, J. Fang, Z. Jiang, W. Song, N. Liu, Y. Gao, X. Li, F. Zeng, Y. Xia, R. A. Badcock, *et al.*, “Design, development, and testing of a 6.6 mva hts traction transformer for high-speed train applications,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 36, no. 8, p. 085009, 2023.
- [38] X. Chen and J. Jin, “Development and technology of hts transformers,” *Research Communication*, vol. 1, no. 1, pp. 2–1, 2007.

- [39] S. Hellmann, M. Abplanalp, L. Hofstetter, and M. Noe, “Manufacturing of a 1-mva-class superconducting fault current limiting transformer with recovery-under-load capabilities,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, pp. 1–5, 2017.
- [40] A. Buchholz, M. Noe, D. Kottonau, E. Shabagin, and M. Weil, “Environmental life-cycle assessment of a 10 kv high-temperature superconducting cable system for energy distribution,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 5, pp. 1–5, 2021.
- [41] M. Yazdani-Asrami, S. Seyyedbarzegar, A. Sadeghi, W. T. de Sousa, and D. Kottonau, “High temperature superconducting cables and their performance against short circuit faults: current development, challenges, solutions, and future trends,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 35, no. 8, p. 083002, 2022.
- [42] M. Majka and S. Kozak, “Zastosowanie taśm i ii generacji do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 5, pp. 183–185, 2009.
- [43] B. KONDRATOWICZ-KUCEWICZ, H. MALINOWSKI, and G. WOJTASIEWICZ, “Ograniczniki prądu z wysokotemperaturowymi elementami nadprzewodnikowymi,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 79, no. 9 (2), pp. 639–643, 2003.
- [44] J. Kozak, M. Majka, S. Kozak, and T. Janowski, “Comparison of inductive and resistive sfcl,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 5600604–5600604, 2012.
- [45] E.-E. C. O. using Superconducting, “Wind generators—world’s first demonstration of a 3.6 mw low-cost lightweight dd superconducting generator on a wind turbine,” *DOI*, vol. 10, p. 656024, 2016.
- [46] V. L. Ginzburg, V. L. Ginzburg, and L. Landau, *On the theory of superconductivity*. Springer, 2009.
- [47] J. R. Schrieffer, *Theory of superconductivity*. CRC press, 2018.
- [48] F. Grilli, *Numerical modelling of high temperature superconducting tapes and cables*. 2004.
- [49] R. Zalecki, *Wnikanie pola magnetycznego i prądu krytyczne wysokotemperaturowych nadprzewodników talowych i bizmutowych*. 2012.
- [50] M. Tinkham, *Introduction to superconductivity*. Courier Corporation, 2004.
- [51] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, “Theory of superconductivity,” *Phys. Rev.*, vol. 108, Dec 1957, doi: 10.1103/PhysRev.108.1175.
- [52] H. Fröhlich, “Electrons in lattice fields,” *Advances in Physics*, vol. 3, no. 11, pp. 325–361, 1954.
- [53] J. Spałek, “Theory of unconventional superconductivity in strongly correlated systems: real space pairing and statistically consistent mean-field theory-in perspective,” *arXiv preprint arXiv:1202.2833*, 2012.
- [54] A. A. Abrikosov, “On the magnetic properties of superconductors of the second group,” *Soviet Physics-JETP*, vol. 5, pp. 1174–1182, 1957.

- [55] J. Stankowski and B. Czyżak, *Nadprzewodnictwo*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1994.
- [56] N. Orlińska, *Otrzymywanie i właściwości skonsolidowanego nadprzewodnika MgB₂*. 2010.
- [57] C. Sosolik, J. A. Stroscio, M. D. Stiles, E. Hudson, S. R. Blankenship, A. P. Fein, and R. Celotta, “Real-space imaging of structural transitions in the vortex lattice of v 3 si,” *Physical Review B*, vol. 68, no. 14, p. 140503, 2003.
- [58] D. Castelvecchi, “First room-temperature superconductor excites — and baffles — scientists,” *Nature*, vol. 586, pp. 349–349, 10 2020, doi: 10.1038/d41586-020-02895-0.
- [59] R. Flükiger, “Overview of superconductivity and challenges in applications,” *Reviews of Accelerator Science and Technology*, vol. 05, pp. 1–23, 01 2012, doi: 10.1142/S1793626812300010.
- [60] K.-H. Mess, S. Wolff, *et al.*, *Superconducting accelerator magnets*. World Scientific, 1996.
- [61] D. Larbalestier, A. Gurevich, D. M. Feldmann, and A. Polyanskii, “High-*t_c* superconducting materials for electric power applications,” *Nature*, vol. 414, no. 6861, pp. 368–377, 2001.
- [62] J. Kozak, “Badania elektromagnesów nadprzewodnikowych w procesie ich wytwarzania i eksploatacji,” *Prace Instytutu Elektrotechniki*, no. 265, pp. 11–150, 2014.
- [63] T. Miyazaki, T. Miyatake, H. Kato, K. Zaitzu, Y. Murakami, T. Hase, and M. Hamada, “Development of nb3sn superconducting wires for high field magnets at kobe steel and jastec,” *Cryogenics*, vol. 48, pp. 341–346, 07 2008, doi: 10.1016/j.cryogenics.2008.05.002.
- [64] H. D. Stryczewska, O. Boiko, M. A. Stepień, P. Lasek, M. Yamazato, and A. Higa, “Selected materials and technologies for electrical energy sector,” *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4543, 2023.
- [65] E. T. Soren Prestemon, Paolo Ferracin, *Practical superconductors for accelerator magnets*. European Organization for Nuclear Research (CERN) adsurl = <https://uspas.fnal.gov/index.shtml>, 2015.
- [66] R. Wijngaarden and R. Griessen, “Concise encyclopedia of magnetic and superconducting materials ed je evetts,” 1992.
- [67] J. Durrell, “Critical current anisotropy in high temperature superconductors,” 2001.
- [68] G. Blatter, V. B. Geshkenbein, and A. Larkin, “From isotropic to anisotropic superconductors: A scaling approach,” *Physical review letters*, vol. 68, no. 6, p. 875, 1992.
- [69] “Międzynarodowy słownik terminologiczny elektryki - część 815: Nadprzewodnictwo.” PN-IEC 60050-815:2002, 2002.
- [70] R. Serway, C. Moses, and C. Moyer, *Modern Physics*. Cengage Learning, 2004.
- [71] A. Alexandrov and V. Kabanov, “Unconventional high-temperature superconductivity from repulsive interactions: Theoretical constraints,” *Physical Review Letters*, vol. 106, no. 13, p. 136403, 2011.

- [72] C. P. Poole, H. A. Farach, R. J. Creswick, and R. Prozorov, *Superconductivity*. Elsevier, 2014.
- [73] Y. Iwasa, *Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational Issues*. Springer US, 2009.
- [74] C. P. Bean, “Magnetization of hard superconductors,” *Physical review letters*, vol. 8, no. 6, p. 250, 1962.
- [75] C. P. Bean, “Magnetization of high-field superconductors,” *Reviews of modern physics*, vol. 36, no. 1, p. 31, 1964.
- [76] W. Norris, “Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 3, no. 4, p. 489, 1970.
- [77] E. H. Brandt, “Superconductors of finite thickness in a perpendicular magnetic field: Strips and slabs,” *Physical review B*, vol. 54, no. 6, p. 4246, 1996.
- [78] B. G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini, and H. Ohsaki, “High-temperature superconductivity: a roadmap for electric power sector applications, 2015–2030,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, pp. 1–7, 2017.
- [79] X.-Y. Xiao, Y. Liu, J.-X. Jin, C.-S. Li, and F.-W. Xu, “Hts applied to power system: Benefits and potential analysis for energy conservation and emission reduction,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, pp. 1–9, 2016.
- [80] M. Yazdani-Asrami, A. Sadeghi, W. Song, A. Madureira, J. Murta-Pina, A. Morandi, and M. Parizh, “Artificial intelligence methods for applied superconductivity: material, design, manufacturing, testing, operation, and condition monitoring,” *Superconductor Science Technology*, vol. 35, p. 123001, Dec. 2022, doi: 10.1088/1361-6668/ac80d8.
- [81] A. Preuß, *Development of high-temperature superconductor cables for high direct current applications*. KIT Scientific Publishing, 2021.
- [82] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, and A. Hobl, “Ampacity project—worldwide first superconducting cable and fault current limiter installation in a german city center,” in *22nd international conference and exhibition on electricity distribution (CIRED 2013)*, pp. 1–4, IET, 2013.
- [83] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, and A. Hobl, “Ampacity—advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply,” in *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*, pp. 1–5, IEEE, 2014.
- [84] N. Magnusson, A. Allais, G. Angeli, G. Bouvier, C. E. Bruzek, J. Candido, C. Creusot, M. Gammelsæter, E. Garofalo, F. Gömöry, *et al.*, “Scarlet—a european effort to develop hts and mgb 2 based mvdc cables,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2023.
- [85] J. Maguire, F. Schmidt, F. Hamber, and T. Welsh, “Development and demonstration of a long length hts cable to operate in the long island power authority transmission grid,” *IEEE transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 1787–1792, 2005.

- [86] T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, H. Takigawa, Y. Ashibe, C. Suzawa, T. Kato, Y. Yamada, K. Sato, S. Isojima, *et al.*, “Design and experimental results for albanys hts cable,” *IEEE transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 1806–1809, 2005.
- [87] B. Yang, J. Kang, S. Lee, C. Choi, and Y. Moon, “Qualification test of a 80 kv 500 mw hts dc cable for applying into real grid,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1–5, 2015.
- [88] S. Yamaguchi, Y. Ivanov, H. Watanabe, N. Chikumoto, H. Koshiduka, K. Hayashi, and T. Sawamura, “Construction and 1st experiment of the 500-meter and 1000-meter dc superconducting power cable in ishikari,” *Physics Procedia*, vol. 81, pp. 182–186, 2016.
- [89] M. Noe, “Superconducting cables,” pp. 17–21, 2017.
- [90] H. Falkner and S. Holt, “Walking the torque: Proposed work plan for energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems,” 2011.
- [91] B. J. H. de Bruyn, “Superconducting linear motors for high-dynamic applications,” 2018.
- [92] C. C. Chow, M. D. Ainslie, and K. Chau, “High temperature superconducting rotating electrical machines: An overview,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1124–1156, 2023.
- [93] X. Song, C. Bühner, A. Mølgaard, R. S. Andersen, P. Brutsaert, M. Bauer, J. Hansen, A. V. Rebsdorf, J. Kellers, T. Winkler, *et al.*, “Commissioning of the world’s first full-scale mw-class superconducting generator on a direct drive wind turbine,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 3, pp. 1697–1704, 2020.
- [94] L. Ybanez, A. Colle, E. Nilsson, F. Berg, G. Galla, M. Tassisto, J. Rivenc, F. Kapaun, and G. Steiner, “Ascend: The first step towards cryogenic electric propulsion,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1241, p. 012034, IOP Publishing, 2022.
- [95] T. Shinzato, S. Arakawa, H. Oyama, H. Saka, and T. Hayasaki, “Development of high-temperature superconducting motor for automobiles,” *SEI Technical Review*, vol. 75, pp. 62–65, 2012.
- [96] B. Gamble, G. Snitchler, and T. MacDonald, “Full power test of a 36.5 mw hts propulsion motor,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 1083–1088, 2010.
- [97] H. Sasa, M. Iwakuma, K. Yoshida, S. Sato, T. Sasayama, T. Yoshida, K. Yamamoto, S. Miura, A. Kawagoe, T. Izumi, *et al.*, “Experimental evaluation of 1 kw-class prototype rebco fully superconducting synchronous motor cooled by subcooled liquid nitrogen for e-aircraft,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 5, pp. 1–6, 2021.
- [98] F. Grilli, T. Benkel, J. Hänisch, M. Lao, T. Reis, E. Berberich, S. Wolfstädter, C. Schneider, P. Miller, C. Palmer, B. Glowacki, V. Climente-Alarcon, A. Smara, L. Tomkow, J. Teigelkötter, A. Stock, J. Büdel, L. Jeunesse, M. Staempflin, G. Delautre, B. Zimmermann, R. van der Woude, A. Perez, S. Samoilenkov, A. Molodyk, E. Pardo, M. Kapolka, S. Li, and A. Dadhich, “Superconducting motors for aircraft propulsion: the advanced superconducting motor experimental demonstrator project,” *Journal of Physics:*

- Conference Series*, vol. 1590, p. 012051, jul 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1590/1/012051, [Online] <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1590/1/012051>.
- [99] Z. Huang, M. Zhang, W. Wang, and T. Coombs, “Trial test of a bulk-type fully hts synchronous motor,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 3, pp. 1–5, 2013.
- [100] C. R. Vargas-Llanos, “Numerical modeling and characterization of high-temperature superconductor coils for electrical machines,” 2023.
- [101] Y. Liu, J. Ou, F. Schreiner, M. Lao, M. Noe, and M. Doppelbauer, “Design of a superconducting dc demonstrator for wind generators,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 4, pp. 1955–1964, 2018.
- [102] P. Lasek, K. Habelok, and M. Stepień, “Armature winding analysis for high-temperature superconducting pm-excited ac machines,” *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 64, no. S1, pp. S269–S278, 2020.
- [103] N. D. Glasson, M. P. Staines, Z. Jiang, and N. S. Allpress, “Verification testing for a 1 mva 3-phase demonstration transformer using 2g-hts roebel cable,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 5500206–5500206, 2012.
- [104] S. Dai, T. Ma, Q. Qiu, Z. Zhu, Y. Teng, and L. Hu, “Development of a 1250-kva superconducting transformer and its demonstration at the superconducting substation,” *IEEE Transactions on applied superconductivity*, vol. 26, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [105] T. Janowski, H. Stryczewska, S. Kozak, H. Malinowski, G. Wojtasiewicz, P. Surdacki, B. Kondratowicz-Kucewicz, and J. Kozak, “Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu,” *Wydawnictwo LIBER, Lublin*, 2002.
- [106] M. Kafarski, “Hybrydowe modele numeryczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu do wyznaczania zmian prądu i temperatury podczas zwarcia,” *Lublin University of Technology*, 2012.
- [107] C. Neumann, “Superconducting fault current limiter (sfcl) in the medium and high voltage grid,” pp. 6–pp, 2006.
- [108] J. Bock, A. Hobl, S. Krämer, M. Bludau, J. Schramm, C. Jänke, M. Rikel, and S. Elschner, “Nexans superconducting fault current limiters for medium voltage applications—status and prospects,” no. 0352, pp. 6–9, 2011.
- [109] S. Elschner, A. Kudymow, J. Brand, S. Fink, W. Goldacker, F. Grilli, M. Noe, M. Vojenciak, A. Hobl, M. Bludau, *et al.*, “Ensyströb—design, manufacturing and test of a 3-phase resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application,” *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 482, pp. 98–104, 2012.
- [110] L. Martini, M. Bocchi, G. Angeli, M. Ascade, V. Rossi, A. Valzasina, C. Ravetta, S. Fratti, and E. Martino, “Live grid field-testing final results of the first italian superconducting fault current limiter and severe 3-phase fault experience,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1–5, 2014.
- [111] L. Xiaolin, “Japan’s maglev train sets a speed record of 600km/h,” *Foreign Railway Vehicles*, vol. 53, no. 06, p. 5, 2016.

- [112] S. Li, “State of art and future development of magnetic levitation technology,” *Highlights in Science, Engineering and Technology*, vol. 31, pp. 167–176, 2023.
- [113] J. F. Gieras, “Ultra high-speed ground transportation systems: Current status and a vision for the future,” *Organ*, vol. 9, p. 20, 2020.
- [114] S. C. Wimbush and N. M. Strickland, “A public database of high-temperature superconductor critical current data,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, pp. 1–5, 2016.
- [115] R. Wu, L. Liu, X. Hu, X. Yang, J. Liu, Y. Zhu, and L. Cai, “Finite element analysis of equivalent mechanical properties of alloy-reinforced bi-2223 composite tapes,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 37, no. 1, pp. 31–39, 2024.
- [116] V. Solovyov and P. Farrell, “Exfoliated ybco filaments for second-generation superconducting cable,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 1, p. 014006, 2016.
- [117] Y. Slimani and E. Hannachi, “Fabrication technologies of superconducting cables and wires,” pp. 271–299, 2022.
- [118] B. Glowacki, “Texture development of hts powder-in-tube conductors,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 11, no. 10, p. 989, 1998.
- [119] A. Sundaram, Y. Zhang, A. Knoll, D. Abraimov, P. Brownsey, M. Kasahara, G. Carota, R. Nakasaki, J. Cameron, G. Schwab, *et al.*, “2g hts wires made on 30 μm thick hastelloy substrate,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 29, no. 10, p. 104007, 2016.
- [120] Y. Chen, M. Zhang, M. Chudy, W. Wang, Z. Zhong, Z. Huang, and T. Coombs, “Theoretical and experimental magnetization loss comparison between ibad coils and rabbits coils,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 8201504–8201504, 2012.
- [121] W. Prusseit, R. Nemetschek, C. Hoffmann, G. Sigl, A. Lümckemann, and H. Kinder, “Isd process development for coated conductors,” *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 426, pp. 866–871, 2005.
- [122] A. Buchholz, *Prospective Life Cycle Assessment of High-Temperature Superconductors for Future Grid Applications*. KIT Scientific Publishing, 2022.
- [123] A. Eulenburg, E. Romans, and C. Pegrum, “Pulsed laser deposition of ybco and nbco using experimental design,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp. 2402–2405, 1999.
- [124] A. G. Thompson, “Mocvd technology for semiconductors,” *Materials Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 255–263, 1997.
- [125] F. Weiss, U. Schmatz, A. Pisch, F. Felten, S. Pignard, J. Sénateur, A. Abrutis, K. Fröhlich, D. Selbmann, and L. Klippe, “Hts thin films by innovative mocvd processes,” *Journal of alloys and compounds*, vol. 251, no. 1-2, pp. 264–269, 1997.
- [126] G. Majkic, E. Galstyan, and V. Selvamanickam, “High performance 2g-hts wire using a novel mocvd system,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1–4, 2014.

- [127] M. W. Rupich, D. T. Verebelyi, W. Zhang, T. Kodenkandath, and X. Li, “Metalorganic deposition of ybco films for second-generation high-temperature superconductor wires,” *MRS bulletin*, vol. 29, no. 8, pp. 572–578, 2004.
- [128] J. Lu, E. Choi, and H. Zhou, “Physical properties of hastelloy® c-276™ at cryogenic temperatures,” *Journal of applied physics*, vol. 103, no. 6, 2008.
- [129] M. W. Rupich, X. Li, S. Sathyamurthy, C. L. Thieme, K. DeMoranville, J. Gannon, and S. Fleshler, “Second generation wire development at amsc,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 6601205–6601205, 2012.
- [130] Y. Zhao, J. Zhu, G. Jiang, C. Chen, W. Wu, Z. Zhang, S. Chen, Y. Hong, Z. Hong, Z. Jin, *et al.*, “Progress in fabrication of second generation high temperature superconducting tape at shanghai superconductor technology,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 32, no. 4, p. 044004, 2019.
- [131] N. Allen, L. Chiesa, and M. Takayasu, “Structural modeling of hts tapes and cables,” *Cryogenics*, vol. 80, pp. 405–418, 2016.
- [132] S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Kaul, A. Vavilov, V. Vysotsky, and S. Fetisov, “Development and production of second generation high tc superconducting tapes at superox and first tests of model cables,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 4, p. 044022, 2014.
- [133] D. Hazelton, Y. Zhang, and A. Knoll, “Introduction of superpower inc. and high temperature superconducting wire,” *Furukawa Electric Review*, vol. 136, pp. 39–44, 2022.
- [134] D. W. Hazelton, “2g hts wire development at superpower,” 2016.
- [135] F. Grilli, F. Sirois, V. M. Zermeno, and M. Vojenčiak, “Self-consistent modeling of the i_{c} of hts devices: How accurate do models really need to be?,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 6, pp. 1–8, 2014.
- [136] P. Leys, M. Klaeser, F. Schleissinger, and T. Schneider, “Angle-dependent J_c measurements of hts coated conductors,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 8000604–8000604, 2012.
- [137] D. Hu, M. D. Ainslie, M. J. Raine, D. P. Hampshire, and J. Zou, “Modeling and comparison of in-field critical current density anisotropy in high-temperature superconducting (hts) coated conductors,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1–6, 2016.
- [138] F. Sirois, D. Watson, W. Zhu, and J. Cave, “Development of a numerical method to determine the local J_c characteristics of anisotropic hts from experimental J_c curves,” vol. 614, no. 1, pp. 1118–1125, 2002.
- [139] L. Rostila, J. Lehtonen, R. Mikkonen, J. Šouc, E. Seiler, T. Melišek, and M. Vojenčiak, “How to determine critical current density in ybco tapes from voltage–current measurements at low magnetic fields,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 20, no. 12, p. 1097, 2007.

- [140] E. Pardo, M. Vojenčiak, F. Gömöry, and J. Šouc, “Low-magnetic-field dependence and anisotropy of the critical current density in coated conductors,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 24, no. 6, p. 065007, 2011.
- [141] K. P. Thakur, A. Raj, E. H. Brandt, J. Kvitkovic, and S. V. Pamidi, “Frequency-dependent critical current and transport ac loss of superconductor strip and roebel cable,” *Superconductor science and technology*, vol. 24, no. 6, p. 065024, 2011.
- [142] X. Zhang, Z. Zhong, H. Ruiz, J. Geng, and T. Coombs, “General approach for the determination of the magneto-angular dependence of the critical current of ybco coated conductors,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 2, p. 025010, 2016.
- [143] X.-S. Yang, “A new metaheuristic bat-inspired algorithm,” pp. 65–74, 2010.
- [144] AURORA Project. .
- [145] B. Zhou, L. Wang, K. Wang, L. Qin, Y. Wang, Z. Zhang, J. Liu, and Q. Wang, “Experimental and simulation studies of scif considering non-uniform critical current,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 35, no. 7, p. 075002, 2022.
- [146] S. C. Wimbush and N. M. Strickland, “Utilising angle-dependent critical current data in the electromagnetic modelling of hts coils,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 35, no. 2, p. 024004, 2022.
- [147] K. Wang, Q. Wang, J. Liu, L. Qin, B. Zhou, L. Wang, Z. Zhang, and Y. Dai, “A helical grid equivalent circuit model for an intra-layer no-insulation coil,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 35, no. 8, p. 085005, 2022.
- [148] G. Liu, G. Zhang, L. Jing, L. Ai, H. Yu, W. Li, and Q. Liu, “Study on the ac loss reduction of rebco double pancake coil,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 8, pp. 1–6, 2018.
- [149] G. Liu, G. Zhang, G. Liu, H. Wang, and L. Jing, “Numerical and experimental study of critical currents of yba 2 cu 3 o 7- δ coils with and without magnetic substrates,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 35, no. 9, pp. 2285–2291, 2022.
- [150] G. Liu, G. Zhang, G. Liu, H. Wang, and L. Jing, “Experimental and numerical study of high frequency superconducting air-core transformer,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 34, no. 8, p. 085011, 2021.
- [151] S. Zou, C. Gu, T. Qu, S. Chen, X. Li, and Z. Han, “Examination and analysis of critical current uniformity of long hts tapes by the mcorder,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1–4, 2014.
- [152] N. Cherpak, A. Barannik, Y. Prokopenko, and S. Vitusevich, “Microwave impedance characterization of large-area hts films: a novel approach,” *Superconductor science and technology*, vol. 17, no. 7, p. 899, 2004.
- [153] X. Granados, B. Bozzo, S. Iliescu, E. Bartolomé, T. Puig, X. Obradors, J. Amorós, and M. Carrera, “Critical current determination of artificially welded hts samples by in-field hall mapping technique,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 3632–3635, 2005.

- [154] T. Machi, N. Chikumoto, K. Nakao, Y. Aoki, Y. Kitoh, H. Fuji, T. Izumi, A. Ibi, and Y. Yamada, “Development of a magneto-optical imaging equipment for long length 2g-hts tapes,” *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 445, pp. 673–676, 2006.
- [155] R. Kwoka, J. Kozak, and M. Majka, “Wyznaczanie charakterystyk $r = f(t)$ taśm nadprzewodnikowych pierwszej i drugiej generacji,” *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, vol. 8, no. 1, pp. 71–74, 2018.
- [156] N. M. Strickland, S. C. Wimbush, A. Pantoja, D. M. Pooke, M. Fee, V. Chamrinskii, Z. Hartwig, J. Cheng, S. Garberg, and B. Sorbom, “Extended-performance “supercurrent” cryogen-free transport critical-current measurement system,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 5, pp. 1–5, 2021.
- [157] N. Strickland, C. Hoffmann, and S. Wimbush, “A 1 ka-class cryogen-free critical current characterization system for superconducting coated conductors,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 85, no. 11, 2014.
- [158] A. Godfrin, *AC losses in high-temperature superconductor tapes and cables for power applications*. KIT Scientific Publishing, 2022.
- [159] K. Kubiczek, F. Grilli, A. Kario, A. Godfrin, V. M. R. Zermeno, M. Stepień, and M. Kampik, “Length uniformity of the angular dependences of i_c and n of commercial rebco tapes with artificial pinning at 77 k,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 1, pp. 1–9, 2018.
- [160] B. Shen, *Study of second generation high temperature superconductors: Electromagnetic characteristics and ac loss analysis*. Springer Nature, 2020.
- [161] K. Habelok, P. Lasek, and M. Stepień, “Badania wpływu pola magnetycznego magnesów trwałych na prąd krytyczny taśm nadprzewodnikowych hts,” vol. R. 94, no. 11, pp. 179–183, 2018, doi: 10.3233/JAE-209524.
- [162] H. Soltner and P. Blümler, “Dipolar halbach magnet stacks made from identically shaped permanent magnets for magnetic resonance,” *Concepts in magnetic resonance part a*, vol. 36, no. 4, pp. 211–222, 2010.
- [163] K. Habelok, P. Lasek, and M. Stepień, “Analysis of magnetic field distribution in a transverse-flux linear motor with superconducting windings,” pp. 1–2, 2020, doi: 10.3233/JAE-209524.
- [164] K. Habelok, P. Lasek, and M. Stepień, “The distribution of the magnetic field in the air gap of the superconducting linear motor,” pp. 1–2, 2019, doi: 10.1109/ISEF45929.2019.9096887.
- [165] Programs to calculate magnetic fields of Halbach mutipoles. .
- [166] J. Zhu, Z. Zhang, H. Zhang, M. Zhang, M. Qiu, and W. Yuan, “Electric measurement of the critical current, ac loss, and current distribution of a prototype hts cable,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 24, no. 3, pp. 1–4, 2013.



Załącznik A

A.1. Lista publikacji

Lista opublikowanych publikacji dotyczących tematyki pracy na dzień 1.05.2024

- Zermeno V. M. R., Habelok Krzysztof, Stępień Mariusz, Grilli F.: A parameter-free method to extract the superconductor's $J_c(B,)$ field-dependence from in-field current-voltage characteristics of high temperature superconductor tapes, *Superconductor Science and Technology*, vol. 30, nr 3, 2017, s. 1-7, DOI:10.1088/1361-6668/30/3/034001, 35 punktów, IF(2,861)
- Habelok Krzysztof, Lasek Paweł, Stępień Mariusz: Analysis of magnetic field distribution in a transverse-flux linear motor with superconducting windings, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 64, nr S1, 2020, s. 279-286, DOI:10.3233/JAE-209524, 70 punktów, IF(0,706);
- Lasek Paweł, Habelok Krzysztof, Stępień Mariusz: Armature winding analysis for high-temperature superconducting PM-excited AC machines, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 64, nr S1, 2020, s. 269-278, DOI:10.3233/JAE-209523, 70 punktów, IF(0,706);
- Habelok Krzysztof, Bodzek Krzysztof, Stępień Mariusz: Power quality measurements in commercial buildings as a base for energy efficiency improvement, W: 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), Kärdla, Estonia, 12-15 June 2019, 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers, ISBN 978-1-7281-2651-7, s. 1-6, DOI:10.1109/PQ.2019.8818239, 20 punktów;
- Habelok Krzysztof, Lasek Paweł, Stępień Mariusz: The distribution of the magnetic field in the air gap of the superconducting linear motor, W: 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic

Engineering (ISEF 2019), Nancy, France, 29-31 August 2019 : Book of abstracts, 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers, ISBN 978-1-7281-1561-0, s. 1-2, DOI:10.1109/ISEF45929.2019.9096887;

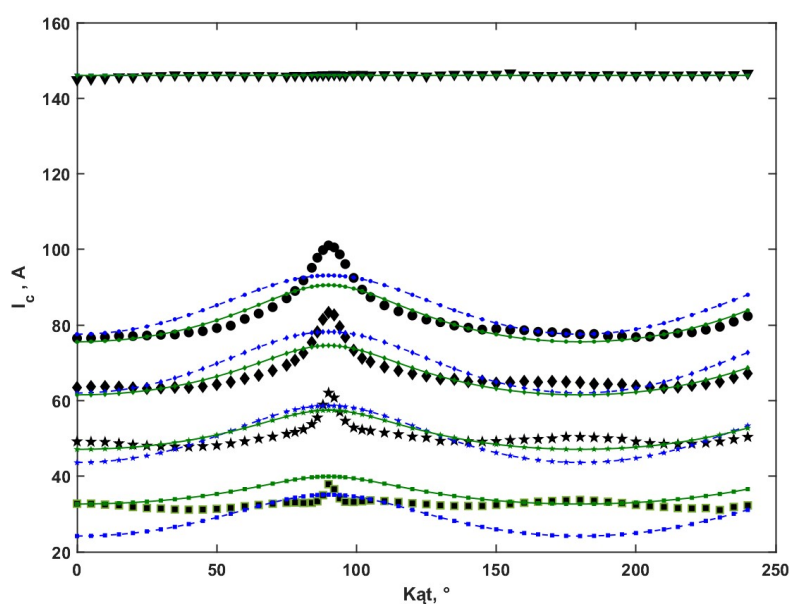
- Lasek Paweł, Habelok Krzysztof, Stępień Mariusz: Design considerations of superconducting armature winding in PM-Excited AC machines, W: 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2019), Nancy, France, 29-31 August 2019 : Book of abstracts, 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers, ISBN 978-1-7281-1561-0, s. 1-2, DOI:10.1109/ISEF45929.2019.9096892;
- Habelok Krzysztof, Stępień Mariusz: Optymalizacja zużycia energii elektrycznej na przykładzie budynków użyteczności publicznej : Studium przypadku, W: Bezpieczeństwo energetyczne państwa / Cwołek A., Siemiątkowski P., Tomaszewski P. (red.), 2018, Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa. Dom Organizatora, ISBN 978-83-7285-860-3, s. 79-94, 20 punktów;
- Habelok Habelok Krzysztof, Lasek Paweł, Stępień Mariusz: Badania wpływu pola magnetycznego magnesów trwałych na prąd krytyczny taśm nadprzewodnikowych HTS, Przegląd Elektrotechniczny, Sigma NOT, vol. R. 94, nr 11, 2018, s. 179-183, DOI:10.15199/48.2018.11.40, 14 punktów;
- Habelok Krzysztof, Lasek Paweł, Stępień Mariusz: Characterization the critical current in HTS tape placed between Halbach arrays, W: 2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (ELMECO & AoS), Nałęczów (Lublin), Poland, December 3-6, 2017, 2017, Institute of Electrical and Electronics Engineers, ISBN 978-1-5386-1944-5, s. 1-4, DOI:10.1109/ELMECO.2017.8267762, 20 punktów;
- Habelok Krzysztof, Lasek Paweł, Stępień Mariusz: Characterization the critical current in HTS tape placed between Halbach arrays, W: 2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (ELMECO & AoS), 3-6 December 2017, Nałęczów, Poland : Book of abstracts, 2017, [b.w.], s. 76;
- Lasek Paweł, Habelok Krzysztof, Stępień Mariusz: Current density distribution FEM modeling in YBCO bulks with Y-211 particles, W: 2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (ELMECO & AoS), 3-6 December 2017, Nałęczów, Poland : Book of abstracts, 2017, [b.w.], s. 79;
- Habelok Krzysztof, Stępień Mariusz: Analiza wpływu kompensacji mocy biernej na wysokość opłat za energię elektryczną na przykładzie hali sportowej, Przegląd Elektrotechniczny, Sigma NOT, vol. R. 93, nr 10, 2017, s. 158-161, DOI:10.15199/48.2017.10.37, 14 punktów;
- Stępień Mariusz, Habelok Krzysztof, Lasek Paweł: Rozwój zastosowań nadprzewodnictwa w elektrotechnice w świetle badań właściwości przewodów i taśm HTS, Śląskie Wiadomości Elektryczne, vol. R. 24, nr 5, 2017, s. 33-37, 1 punkt

B

Załącznik B

B.1. Wybrane wyniki pomiarów

B.1.1. Wyniki porównania modeli prądu krytycznego taśm HTS



Rysunek B.1. Porównanie wyników pomiarów z dopasowaniem modeli matematycznych anizotropii produkcji Shanghai Superconductor PA1212 2G HTS, kolor niebieski dla funkcji celu (3.9), kolor zielony dla funkcji celu (3.10).

Tabela B.1. Porównanie wyników optymalizacji i parametrów modeli I_c dla taśmy Shanghai Superconductor PA1212 2G HTS.

MODEL	PARAMETRY MODELU					Error	$F(x)$	ϵ
	B_{c0}	k	b	l	α			
Kim-like (KL)	0,29	0,66	1,21			19,33	L_1	ϵ_1
	0,37	0,83	1,20	1,27		19,32	L_1	ϵ_2
	0,13	0,68	0,70			38,67	L_2	ϵ_1
	0,36	1,95	0,70	2,89		38,65	L_2	ϵ_2
Magneto-angular anisotropy (MAA)	1,19	0,71	2,96		0,80	19,73	L_1	ϵ_1
	1,25	2,59	1,20	3,94	0,93	19,34	L_1	ϵ_2
	0,06	0,44	0,25		2,16	33,28	L_2	ϵ_1
	0,13	2,19	0,28	4,54	1,94	34,31	L_2	ϵ_2
Percolation (PER)	0,39	0,92	3,61		0,66	20,74	L_1	ϵ_1
	2,14	3,14	0,73	4,69	0,66	19,55	L_1	ϵ_2
	0,40	1,17	-1,34		0,61	44,97	L_2	ϵ_1
	1,10	2,55	0,40	4,57	0,61	36,91	L_2	ϵ_2
Kim-tanh (KTH)	0,10	0,83	1,54		0,73	20,19	L_1	ϵ_1
	1,42	5,38	0,99	7,24	0,73	19,68	L_1	ϵ_2
	0,09	1,76	-0,33		0,67	48,13	L_2	ϵ_1
	0,31	4,32	0,41	7,34	0,62	36,76	L_2	ϵ_2
Kim-cosh (KCH)	0,12	0,94	3,15		0,44	20,76	L_1	ϵ_1
	0,63	3,43	0,43	5,28	0,43	19,35	L_1	ϵ_2
	0,12	0,96	3,02		0,43	42,71	L_2	ϵ_1
	0,38	3,00	0,31	4,72	0,38	38,24	L_2	ϵ_2
Kim-cosh-power (KCP)	0,11	0,93	2,15		-0,18	20,73	L_1	ϵ_1
	1,18	2,93	0,74	4,00	-0,26	19,79	L_1	ϵ_2
	0,11	0,84	0,69		-0,20	41,37	L_2	ϵ_1
	1,60	3,39	0,73	4,40	-0,33	40,34	L_2	ϵ_2

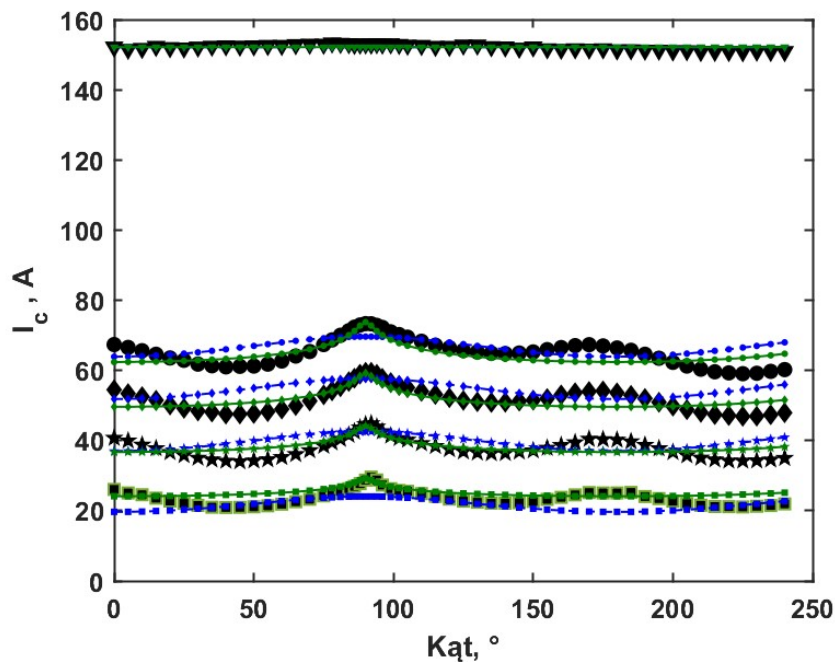
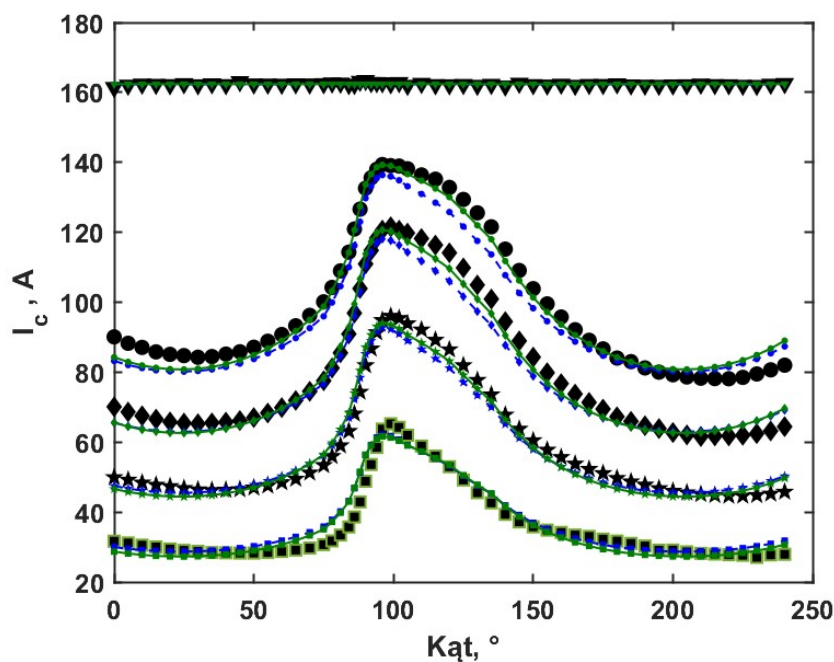
**Rysunek B.2.** Porównanie wyników pomiarów z dopasowaniem modeli matematycznych anizotropii produkcji SuperOx 2G HTS, kolor niebieski dla funkcji celu (3.9), kolor zielony dla funkcji celu (3.10).

Tabela B.2. Wyniki dopasowania modeli z wykorzystaniem algorytmu nietoperzy dla taśmy SuperOx 2G HTS.

MODEL	PARAMETRY MODELU					Error	F(x)	e
	B_{c0}	k	b	l	alpha			
Kim-like (KL)	0,13	0,84	0,94			25,21	L_1	ϵ_1
	0,69	4,48	0,94	5,34		25,11	L_1	ϵ_2
	0,17	0,85	1,09			48,77	L_2	ϵ_1
	0,25	2,76	0,68	3,36		48,52	L_2	ϵ_2
Magneto-angular anisotropy (MAA)	1,57	0,89	3,61		0,63	25,32	L_1	ϵ_1
	0,27	0,91	1,43	1,06	0,83	25,21	L_1	ϵ_2
	0,65	0,88	2,47		0,75	49,03	L_2	ϵ_1
	0,13	3,67	0,38	4,92	1,49	47,80	L_2	ϵ_2
Percolation (PER)	0,26	0,97	3,12		0,53	25,60	L_1	ϵ_1
	1,31	4,34	0,51	5,32	0,53	25,08	L_1	ϵ_2
	0,27	0,96	2,80		0,57	49,78	L_2	ϵ_1
Kim-tanh (KTH)	0,84	2,59	0,56	3,31	0,58	49,73	L_2	ϵ_2
	0,06	0,92	1,49		0,70	25,38	L_1	ϵ_1
	0,79	3,53	1,33	3,85	0,69	25,35	L_1	ϵ_2
Kim-cosh (KCH)	0,05	0,04	0,06		0,62	36,72	L_2	ϵ_1
	0,10	3,46	0,28	5,31	0,59	46,90	L_2	ϵ_2
	0,06	4,43	-0,05		0,36	28,96	L_1	ϵ_1
Kim-cosh (KCH)	0,89	3,05	0,80	3,32	0,36	25,42	L_1	ϵ_2
	0,07	1,26	-0,23		0,39	51,14	L_2	ϵ_1
	0,04	7,00	-0,10	4,48	0,36	52,24	L_2	ϵ_2
Kim-cosh-power (KCP)	0,06	4,82	-0,04		-0,23	29,06	L_1	ϵ_1
	1,93	6,81	0,61	7,94	-0,42	25,21	L_1	ϵ_2
	0,07	3,59	-0,03		-0,21	55,00	L_2	ϵ_1
	0,21	4,66	0,22	6,30	-0,25	47,87	L_2	ϵ_2



Rysunek B.3. Porównanie wyników pomiarów z dopasowaniem modeli matematycznych anizotropii produkcji Theva 2G HTS, kolor niebieski dla funkcji celu (3.9), kolor zielony dla funkcji celu (3.10).

Tabela B.3. Porównanie wyników optymalizacji i parametrów modeli I_c dla taśmy SuperOx 2G HTS.

MODEL	PARAMETRY MODELU					Error	F(x)	e
	B_{c0}	k	b	l	α			
Kim-like (KL)	0,90	0,33	3,28			37,48	L_1	ϵ_1
	3,30	1,46	2,74	4,52		38,14	L_1	ϵ_2
	0,55	-0,30	2,18			72,55	L_2	ϵ_1
	2,38	1,36	2,06	4,66		72,62	L_2	ϵ_2
Magneto-angular anisotropy (MAA)	0,78	0,32	2,91		1,01	36,99	L_1	ϵ_1
	1,06	1,99	0,95	8,19	1,26	29,80	L_1	ϵ_2
	1,07	0,34	3,54		0,94	77,93	L_2	ϵ_1
	0,42	0,82	0,64	5,65	1,48	51,80	L_2	ϵ_2
Percolation (PER)	0,30	0,71	2,98		0,90	50,37	L_1	ϵ_1
	1,75	1,87	0,77	6,71	0,88	39,57	L_1	ϵ_2
	0,33	0,62	1,87		0,83	88,52	L_2	ϵ_1
	2,04	2,05	0,76	7,17	0,83	89,13	L_2	ϵ_2
Kim-tanh (KTH)	0,08	0,22	0,53		0,69	25,98	L_1	ϵ_1
	1,19	2,73	1,16	5,56	0,75	31,38	L_1	ϵ_2
	0,08	0,79	3,29		0,70	81,72	L_2	ϵ_1
	0,40	1,49	0,62	5,98	0,73	40,86	L_2	ϵ_2
Kim-cosh (KCH)	0,12	0,68	1,58		0,56	45,94	L_1	ϵ_1
	2,95	2,49	1,27	4,05	0,56	44,33	L_1	ϵ_2
	0,11	1,32	-1,91		0,49	114,45	L_2	ϵ_1
	0,83	1,46	1,11	2,41	0,51	74,72	L_2	ϵ_2
Kim-cosh-power (KCP)	0,12	0,74	1,77		-0,05	50,30	L_1	ϵ_1
	1,40	2,50	0,76	6,98	-0,09	41,24	L_1	ϵ_2
	0,12	7,04	-0,27		0,08	180,63	L_2	ϵ_1
	2,30	3,08	0,86	7,76	-0,15	91,59	L_2	ϵ_2

B.1.2. Porównanie modeli numerycznych dla poszczególnych taśm

Tabela B.4. Podsumowanie wyników badań związanych z dopasowaniem modeli numerycznych do pomiarów.

PRODUCENT	KL	MAA	PER	KTH	KCH	KCP	Function	eps
AMSC SUP.	19,0	18,2	21,9	19,9	20,0	168,4	L_1	ϵ_1
	19,1	18,1	21,7	20,3	19,8	21,1	L_1	ϵ_2
	36,6	27,8	48,3	44,3	44,2	59,4	L_2	ϵ_1
	36,6	27,6	47,8	23,2	40,9	46,3	L_2	ϵ_2
SHANGHAI SUP.	19,3	19,7	20,7	20,2	20,8	20,7	L_1	ϵ_1
	19,3	19,3	19,5	19,7	19,3	19,8	L_1	ϵ_2
	38,7	33,3	45,0	48,1	42,7	41,4	L_2	ϵ_1
	38,7	34,3	36,9	36,8	38,2	40,3	L_2	ϵ_2
SuperOX	25,2	25,3	25,6	25,4	29,0	29,1	L_1	ϵ_1
	25,1	25,2	25,1	25,4	25,4	25,2	L_1	ϵ_2
	48,8	49,0	49,8	36,7	51,1	55,0	L_2	ϵ_1
	48,5	47,8	49,7	46,9	52,2	47,9	L_2	ϵ_2
SuperPower	26,7	27,8	30,5	29,0	31,3	31,3	L_1	ϵ_1
	25,8	26,1	25,2	27,0	31,0	26,9	L_1	ϵ_2
	44,9	49,4	53,7	56,5	58,0	54,7	L_2	ϵ_1
	44,9	33,1	41,4	26,9	38,0	43,7	L_2	ϵ_2
THEVAPro	37,5	37,0	50,4	26,0	45,9	50,3	L_1	ϵ_1
	38,1	29,8	39,6	31,4	44,3	41,2	L_1	ϵ_2
	72,5	77,9	88,5	81,7	114,5	180,6	L_2	ϵ_1
	72,6	51,8	89,1	40,9	74,7	91,6	L_2	ϵ_2

B.1.3. FH 51 wyniki pomiarów pola magnetycznego

Poniżej zaprezentowano wyniki pomiarów zrealizowanych gausometrem FH51, który dla pomiarów DC charakteryzuje się dokładnością 2 %. Kolorem zielony zaznaczono dane wykorzystane na Rys.: 5.15.

Tabela B.5. Wyniki pomiarów pola magnetycznego na powierzchni taśmy. Pomiar zrealizowany dla trzech punktów pomiarowych.

kąt	Nr	T=295 K	T=295 K	T=295 K	T=77 K	T=77 K	T=77 K
		I, T	II, T	III, T	I, T	II, T	III, T
0	1	0.132 ± 0.003	0.195 ± 0.004	0.306 ± 0.006	0.158 ± 0.003	0.230 ± 0.005	0.361 ± 0.007
0	2	0.134 ± 0.003	0.208 ± 0.004	0.311 ± 0.006	0.163 ± 0.003	0.254 ± 0.005	0.384 ± 0.008
0	3	0.135 ± 0.003	0.202 ± 0.004	0.305 ± 0.006	0.147 ± 0.003	0.247 ± 0.005	0.378 ± 0.008
45	1	0.103 ± 0.002	0.144 ± 0.003	0.220 ± 0.004	0.085 ± 0.002	0.170 ± 0.003	0.266 ± 0.005
45	2	0.100 ± 0.002	0.142 ± 0.003	0.225 ± 0.005	0.073 ± 0.001	0.182 ± 0.004	0.325 ± 0.007
45	3	0.107 ± 0.002	0.148 ± 0.003	0.249 ± 0.005	0.068 ± 0.001	0.177 ± 0.004	0.299 ± 0.006

B.1.4. Czujnik Hala CYSJ362A GaAs wyniki pomiarów pola magnetycznego

Pomiary pola magnetycznego w funkcji kąta wybaczone z wykorzystaniem czujnika CYSJ362A GaAs. Pomiary przeprowadzono dla magnesu pracującego w temperaturze 295 K oraz 77 K. Wyniki pomiarów zaprezentowano na Rys.: ??.

Tabela B.6. Wyniki pomiarów pola magnetycznego na powierzchni taśmy. Pomiar zrealizowany dla trzech punktów pomiarowych.

kąt	I 295 K, T	II 295 K, T	III 295 K, T
0	-0.00515 ± 0.00010	0.007416 ± 0.000148	0.008114 ± 0.000162
15	0.018585 ± 0.000372	0.043717 ± 0.000874	0.075132 ± 0.001503
30	0.044415 ± 0.000888	0.080018 ± 0.001600	0.149828 ± 0.002997
45	0.069547 ± 0.001391	0.113527 ± 0.002271	0.217544 ± 0.004351
60	0.085603 ± 0.001712	0.134470 ± 0.002689	0.260826 ± 0.005217
75	0.100961 ± 0.002019	0.157507 ± 0.003150	0.290146 ± 0.005803
90	0.107942 ± 0.002159	0.166583 ± 0.003332	0.299920 ± 0.005998
105	0.106546 ± 0.002131	0.164488 ± 0.003290	0.290146 ± 0.005803
120	0.098169 ± 0.001963	0.153319 ± 0.003066	0.257336 ± 0.005147
135	0.082113 ± 0.001642	0.129583 ± 0.002592	0.204978 ± 0.004100
150	0.060471 ± 0.001209	0.095376 ± 0.001908	0.140753 ± 0.002815
165	0.034642 ± 0.000693	0.051396 ± 0.001028	0.069547 ± 0.001391
180	0.001133 ± 0.000023	0.006718 ± 0.000134	-0.011433 ± 0.000229
195	-0.027489 ± 0.000550	-0.030282 ± 0.000606	-0.083337 ± 0.001667
210	-0.054715 ± 0.001094	-0.069375 ± 0.001388	-0.160128 ± 0.003203
225	-0.079847 ± 0.001597	-0.107771 ± 0.002155	-0.215278 ± 0.004306
240	-0.096601 ± 0.001932	-0.130808 ± 0.002616	-0.263447 ± 0.005269
255	-0.109167 ± 0.002183	-0.148261 ± 0.002965	-0.288579 ± 0.005772
270	-0.114054 ± 0.002281	-0.155940 ± 0.003119	-0.298352 ± 0.005967
285	-0.111959 ± 0.002239	-0.149657 ± 0.002993	-0.287881 ± 0.005758
300	-0.104280 ± 0.002086	-0.136393 ± 0.002728	-0.256466 ± 0.005129
315	-0.091016 ± 0.001820	-0.109865 ± 0.002198	-0.209693 ± 0.004194
330	-0.072866 ± 0.001457	-0.073564 ± 0.001471	-0.146166 ± 0.002923
345	-0.049130 ± 0.000983	-0.041451 ± 0.000829	-0.077054 ± 0.001541
360	-0.017018 ± 0.000340	0.000435 ± 0.000009	0.008114 ± 0.000162
	I 77 K, T	II 77 K, T	III 77 K, T
0	-0.007043 ± 0.000141	0.009906 ± 0.000198	0.009200 ± 0.000184
15	0.007081 ± 0.000142	0.055456 ± 0.001109	0.084763 ± 0.001695
30	0.042038 ± 0.000841	0.092531 ± 0.001851	0.162445 ± 0.003249
45	0.064636 ± 0.001293	0.120426 ± 0.002409	0.222472 ± 0.004449
60	0.084763 ± 0.001695	0.139847 ± 0.002797	0.287089 ± 0.005742
75	0.096415 ± 0.001928	0.151852 ± 0.003037	0.306863 ± 0.006137
90	0.101359 ± 0.002027	0.158914 ± 0.003178	0.315690 ± 0.006314
105	0.099946 ± 0.001999	0.152911 ± 0.003058	0.302626 ± 0.006053
120	0.089353 ± 0.001787	0.134197 ± 0.002684	0.274025 ± 0.005480
135	0.072051 ± 0.001441	0.111599 ± 0.002232	0.214704 ± 0.004294
150	0.043803 ± 0.000876	0.074523 ± 0.001490	0.159620 ± 0.003192
165	0.015555 ± 0.000311	0.035329 ± 0.000707	0.080173 ± 0.001603
180	-0.014458 ± 0.000289	-0.016930 ± 0.000339	-0.015164 ± 0.000303
195	-0.043059 ± 0.000861	-0.058949 ± 0.001179	-0.078369 ± 0.001567
210	-0.060008 ± 0.001200	-0.094612 ± 0.001892	-0.167704 ± 0.003354
225	-0.078016 ± 0.001560	-0.123566 ± 0.002471	-0.225965 ± 0.004519
240	-0.098849 ± 0.001977	-0.144752 ± 0.002895	-0.266218 ± 0.005324
255	-0.110854 ± 0.002217	-0.158876 ± 0.003178	-0.299763 ± 0.005995
270	-0.120035 ± 0.002401	-0.158170 ± 0.003163	-0.309650 ± 0.006193
285	-0.114032 ± 0.002281	-0.149695 ± 0.002994	-0.297644 ± 0.005953
300	-0.108383 ± 0.002168	-0.131334 ± 0.002627	-0.270103 ± 0.005402
315	-0.088256 ± 0.001765	-0.109089 ± 0.002182	-0.227377 ± 0.004548
330	-0.064598 ± 0.001292	-0.072367 ± 0.001447	-0.156051 ± 0.003121
345	-0.036350 ± 0.000727	-0.026110 ± 0.000522	-0.088609 ± 0.001772
360	-0.007396 ± 0.000148	0.009906 ± 0.000198	-0.003512 ± 0.000070

C

Załącznik C

C.1. Klasyczna metoda wyznaczania niepewności pomiarowych

Analizę niepewności pomiarów prądu krytycznych sprowadzamy do wyznaczenia poszczególnych mierników

- Pomiar napięcia wykonywany miernikiem Agilent U3402A 5,5 cyfry o dokładności 0,012% +0,008 ;
- Pomiar prądu transportu odczytywany z TDK Lambda o dokładności 0,2% +0,1

Pomiar realizowany był z wykorzystaniem metody czterozaciskowej celem wyeliminowania rezystancji kontaktów i przewodów.

Celem wyznaczenia prądu krytycznego I_c wykorzystano równanie (C.1). Równanie to zlogarytmowano stronami (C.2). W efekcie czego dla tak powstałego równania można wyznaczyć niepewności: dla pomiaru prądu (C.3) oraz dla pomiaru napięcia (C.4).

$$\frac{U}{U_c} = \left(\frac{I}{I_c}\right)^n \quad (\text{C.1})$$

$$\ln\left(\frac{U}{U_c}\right) = n(\ln(I) - \ln(I_c)) \quad (\text{C.2})$$

$$\delta(\ln(I)) = \frac{1}{I}\delta(I) \quad (\text{C.3})$$

$$\delta\left(\ln\left(\frac{U}{U_c}\right)\right) = \frac{1}{U}\delta(U) \quad (\text{C.4})$$

Wykorzystując prawo przenoszenia niepewności zapisujemy łączną niepewność pomiaru prądu krytycznego I_c (C.5).

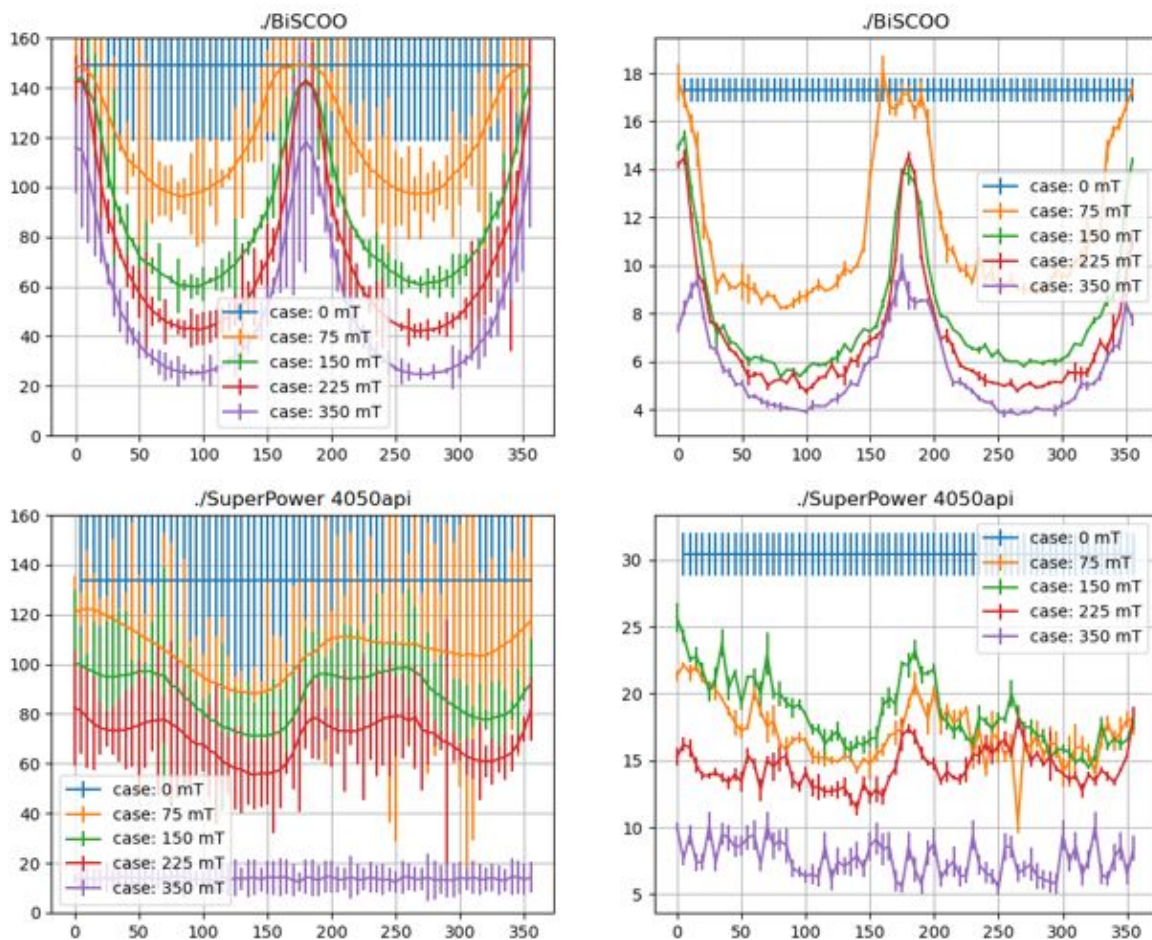
$$\delta I_c = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\delta a\right)^2 + \left(\frac{b}{n^2}\delta n\right)^2} \cdot I_c \quad (\text{C.5})$$

Gdzie $a = \ln\left(\frac{U}{U_c}\right)$, $b = -n \cdot \ln(I_c)$

Podstawiając odpowiednio współczynniki do równania (C.5) otrzymujemy równanie (C.6)

$$\delta I_c = \sqrt{\left(\frac{\delta U}{n}\right)^2 + \left(\frac{\delta n \cdot \ln(I_c)}{n}\right)^2} \cdot I_c \quad (\text{C.6})$$

Wykorzystując równanie (C.6) wyznaczono współczynniki niepewności dla wszystkich zrealizowanych pomiarów.



Rysunek C.1. Wyznaczone niepewności pomiarowe z wykorzystaniem metody klasycznej dla prądów krytycznych I_c oraz wykładników potęgowych n dla taśm BiSCOO oraz SuperPower4050api

C.2. Metoda wyznaczania niepewności dopasowania funkcji nieliniowej przy mocy funkcji *curve_fit* [1]

Funkcja *curve_fit* z modułu SciPy wykorzystuje metodę najmniejszych kwadratów w celu znalezienia optymalnych parametrów dopasowania modelu do danych pomiarowych. Funkcja ta wykorzystuje algorytm Levenberga-Marquardta w celu wyznaczenia parametrów $\mathbf{p} = \{I_c; n\}$ minimalizujących sumę najmniejszych kwadratów residuów funkcji $S(\mathbf{p})$ (C.7).

$$S(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^N [U_i - f(I_i, \mathbf{p})]^2 \quad (\text{C.7})$$

$$f(I; I_c; n) = U_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (\text{C.8})$$

gdzie: U_i - zmierzone spadki napięć na badanej taśmie; $f(I_i; \mathbf{p})$ - model potęgowy spadku napięcia na taśmie; I_i - zmierzony prąd płynący przez taśmę (zmienna niezależna).

Algorytm Levenberga-Marquardta (LM) jest kombinacją algorytmów Gauss-Newton i metody gradientu prostego, dzięki czemu jest efektywny w rozwiązywaniu nieliniowego problemu najmniejszych kwadratów.

Metoda Gaussa-Newtona aproksymuje nieliniowy problem poprzez jego linearyzację, a następnie iteracyjnie wyznacza poszukiwane parametry. W każdej iteracji program aktualizuje parametry \mathbf{p} poprzez rozwiązanie (C.9).

$$\mathbf{p}_{\text{new}} = \mathbf{p}_{\text{old}} - (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{r} \quad (\text{C.9})$$

gdzie: \mathbf{J} - Jakobian macierzy względem poszukiwanych parametrów \mathbf{p} ; $\mathbf{r} = U_i - f(I_i, \mathbf{p})$ - residua.

Algorytm LM wprowadza parametr tłumienia λ do równania (C.9), który poprawia stabilność i zbieżność algorytmu (C.10). Dla dużych wartości λ algorytm zachowuje się jak metoda zachowuje się jak metoda gradientu prostego, natomiast dla małych wartości λ jak metoda Gaussa-Newtona.

$$\mathbf{p}_{\text{new}} = \mathbf{p}_{\text{old}} - (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{r} \quad (\text{C.10})$$

Parametr λ ulega modyfikacji w kolejnych iteracjach algorytmu: jeśli w kolejnym kroku $S(\mathbf{p})$ ulega zmniejszeniu to λ również ulega zmniejszeniu, w przeciwnym razie wartość λ jest zwiększana.

Macierz Jakobiego \mathbf{J} zawiera pochodne cząstkowe modelu (C.8) względem parametrów $\mathbf{p} = \{I_c; n\}$ (C.11)

$$\mathbf{J}_{ij} = \frac{\partial f(I_i, \mathbf{p})}{\partial p_j} \quad (\text{C.11})$$

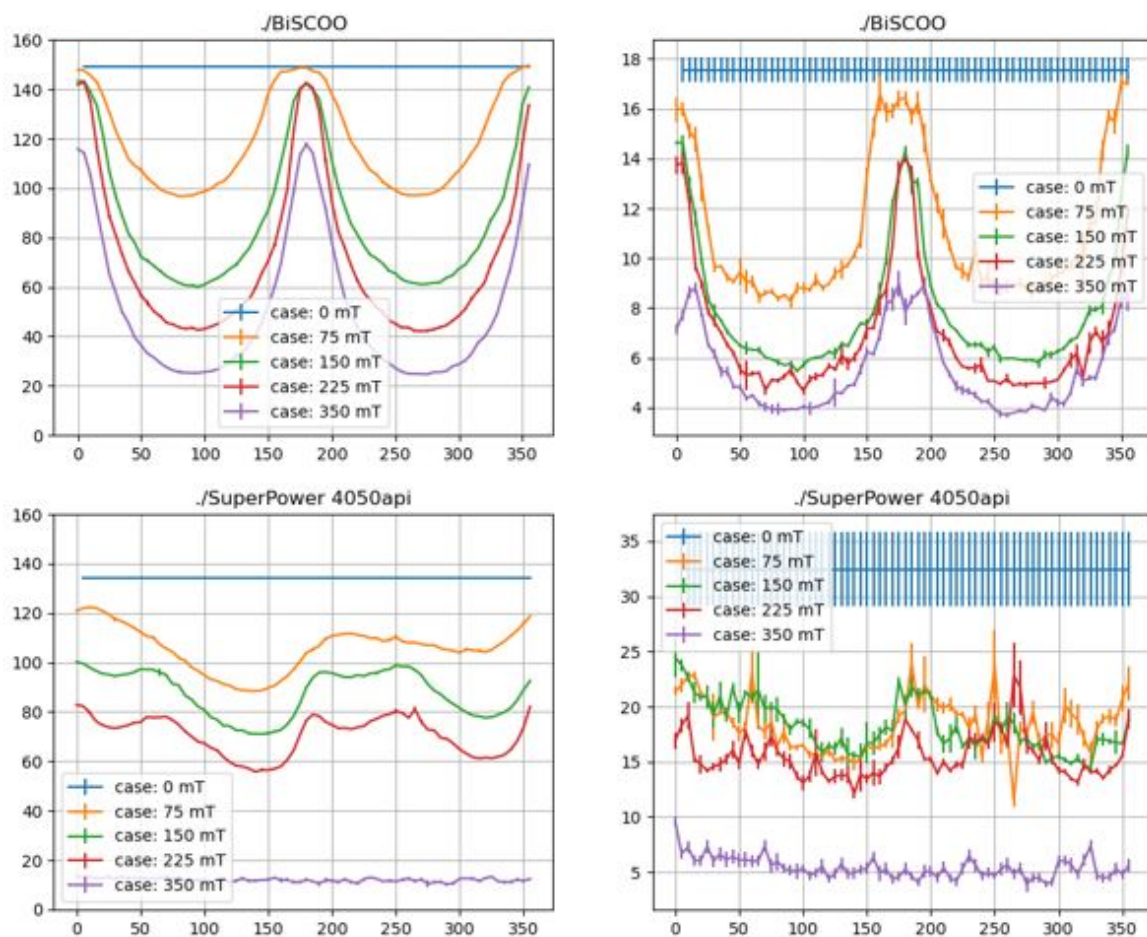
Następnie wyznaczana jest macierz kowariancji \mathbf{C} estymowanych parametrów \mathbf{p} za pomocą równania (C.12).

$$\mathbf{C} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} = \begin{bmatrix} \text{var}(I_c) & \text{cov}(I_c, n) \\ \text{cov}(n, I_c) & \text{var}(n) \end{bmatrix} \quad (\text{C.12})$$

Macierz kowariancji \mathbf{C} zawiera na głównej przekątnej wariancje poszukiwanych parametrów $\mathbf{p} = \{I_c; n\}$, zatem ich odchylenia standardowe można wyznaczyć odpowiednio przy pomocy równań (C.13) oraz (C.14).

$$\sigma_{I_c} = \sqrt{\text{var}(I_c)} \quad (\text{C.13})$$

$$\sigma_n = \sqrt{\text{var}(n)} \quad (\text{C.14})$$



Rysunek C.2. Wyznaczone niepewności pomiarowe z wykorzystaniem metody klasycznej dla prądów krytycznych I_c oraz wykładników potęgowych n dla taśm BiSCOO oraz SuperPower4050api

D

Załącznik D

D.1. Kod źródłowy metody MBP 1D

Kod źródłowy wykorzystany do generowania modeli gęstości prądu. Przedstawiona część w której budowano geometrię oraz główna część iteracyjna. W przedstawieniu pominięto części związane z importowaniem danych pomiarowych oraz postprocesingem związanym z wykreślaniem charakterystyk.

```
1           %% Budowanie geometrii łątki HTS.
2           Rx = (-a+a/n):(2*a/n):(a-a/n);
3           Ry = zeros(1,n);           % Positions
4           for i = 1:n
5               for j = 1:n
6                   normr2(i,j) = (Rx(i)-Rx(j))^2+(Ry(i)-Ry(j))^2;
7                   xx(i,j) = (Rx(j)-Rx(i));
8                   yy(i,j) = (Ry(j)-Ry(i));
9                   if normr2(i,j)==0
10                      xn(i,j)=0;
11                      yn(i,j)=0;
12                  else
13                      xn(i,j)=xx(i,j)/normr2(i,j);
14                      yn(i,j)=yy(i,j)/normr2(i,j);
15                  end
16              end
17          end
18
19
20
21
22
```

```
23     %% Main part of program
24     Bx = zeros(1,n);
25     By = zeros(1,n);
26     Ic = zeros(1,n);
27     B0x = kron(bAmp,cos(bAng*pi/180))';
28     B0y = kron(bAmp,sin(bAng*pi/180))';
29     IcAll = zeros(1,length(B0x));
30     diff=zeros(length(JcIc),1);
31     for ww = 1 : 5
32         newFc=scatteredInterpolant(BxIc,ByIc,JcIc);
33         for j = 1 : length(B0x)
34             err = 1;
35             Imeas=Im(j,1);
36             while (err > 0.01)
37                 IcOld = Ic;
38                 Ic = (2*a*d/n)*newFc(Bx+B0x(j),By+B0y(j));
39                 for i = 1:n
40                     Bx(i)= -mu0/(2*pi)*Ic*yn(i,:)';
41                     By(i)= mu0/(2*pi)*Ic*xn(i,:)';
42                 end
43                 err = norm(IcOld-Ic);
44             end
45             IcAll(j) = sum(Ic);
46             e(j)=((IcAll(j)-Imeas)/Imeas)^2;
47             eavg(j)=abs((IcAll(j)-Imeas)/Imeas);
48         end
49         NhNt=length(B0x);
50         error =sum(e)/NhNt
51         erroravg =100*sum(eavg)/NhNt
52         IcAllPlot = reshape(IcAll,[length(bAng),length(bAmp)])';
53         Idmeas = reshape(Im,[length(bAng),length(bAmp)])';
54         diff=(IcAll-Im)';
55         figure(22)
56         plot(diff)
57         hold on
58         diff1=smooth((IcAll-Im)',0.1,'loess');
59         plot(diff1)
60         JcIc=(JcIc-0.5*diff1/(2*a*d));
61     end
```