

WNIOSEK O PRZEPROWADZENIE POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO
W DZIEDZINIE NAUK TECHNICZNYCH

dr inż. Łukasz Tomków

AUTOREFERAT

przedstawiający opis osiągnięć naukowych

CERN
1 maja 2021



1. Imię i nazwisko: Łukasz Tomków

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:

1. Inżynier, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, 2012, „Installations for the liquefaction of natural gas in the vicinity of natural gas deposits”
2. Magister inżynier, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, 2013, „Investigations on superconducting magnetic shields based on YBCO and BSCCO”
3. Doktor inżynier, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, 2017, „Numerical modeling of superconducting components applied in the devices for high energy physics”

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

1. 10.2017 – 03.2019: asystent naukowo-dydaktyczny, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska, urlop bezpłatny w okresie 03.2018-03.2019
2. 03.2018 – 03.2019: pracownik naukowy (scientist), Laboratorium Fizyki Wysokich Energii im. Wekslera i Baldina, Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych, Dubna, Rosja
3. 03.2019 – 03.2020: pracownik naukowy (research associate), Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Uniwersytet w Cambridge, Cambridge, Zjednoczone Królestwo
4. 03.2020 – obecnie: starszy pracownik naukowy (senior fellow), Europejska Organizacja Badań Jądrowych CERN, Genewa, Szwajcaria

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy:

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji powiązanych tematycznie, pod tytułem:

Termiczne i elektromagnetyczne uwarunkowania pułapkowania i kontroli strumienia magnetycznego w urządzeniach i maszynach nadprzewodzących

b) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

[H1] **Ł. Tomków**, E. Kulikov, K. Kozłowski, V. Drobin: *Improvement of the homogeneity of magnetic field by the attenuation of a selected component with an open superconducting shield made of commercial tapes*, Journal of Applied Physics 126(8), 2019, ISSN: 1089-7550

IF: 2.268 (2019), MNiSW: 70

DOI: 10.1063/1.5112036

[H2] **Ł. Tomków**, A. Smara, V. Climente-Alarcon, B.A. Głowacki: *Distribution of trapped magnetic flux in superconducting stacks magnetised by angled field*, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2019, ISSN: 1557-1947

IF: 1.244 (2019), MNiSW: 40

DOI: 10.1007/s10948-019-05375-3

[H3] A. Smara, N. Mineev, V. Climente-Alarcon, **Ł. Tomków**, T. Reis, B.A. Głowacki: *Influence of the architecture of composite superconductive tape-based stacks on AC demagnetisation for electric machine components*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 30(4), 2020, ISSN: 1051-8223

IF: 1.692 (2020), MNiSW: 70

DOI: 10.1109/TASC.2020.2990826

[H4] V. Climente-Alarcon, A. Smara, N. Mineev, **Ł. Tomków**, B.A. Głowacki: *Superconducting magnetic heterostructured components for electric motor applications*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 30(4), 2020, ISSN: 1051-8223
IF: 1.692 (2020), MNiSW: 70
DOI: 10.1109/TASC.2020.2969071

[H5] **Ł. Tomków**, N. Mineev, A. Smara, V. Climente-Alarcon, B.A. Głowacki: *Theoretical analysis of heat transport in tilted stacks of HTS tapes at temperatures above 20K*, Cryogenics 105, 103017, 2020, ISSN: 0011-2275
IF: 1.818 (2020), MNiSW: 100
DOI: 10.1016/j.cryogenics.2019.103017

[H6] V. Climente-Alarcon, A. Smara, N. Mineev, **Ł. Tomków**, B.A. Głowacki: *Trapped-flux magnets characterization for application in synchronous machines*, Journal of Physics: Conference Series 1559(1), 012148, 2020, ISSN: 1742-6588
IF: 0.540, MNiSW: 40
DOI: 10.1088/1742-6596/1559/1/012148

[H7] A. Smara, N. Mineev, V. Climente-Alarcon, **Ł. Tomków**, B.A. Głowacki: *Effect of HTS stack sectioning on pulse magnetization efficiency in a motor*, Journal of Physics: Conference Series 1559(1), 012136, 2020, ISSN: 1742-6588
IF: 0.540, MNiSW: 40
DOI: 10.1088/1742-6596/1559/1/012136

[H8] **Ł. Tomków**, N. Mineev, A. Smara, V. Climente-Alarcon, B.A. Głowacki: *Heat extraction from HTS tape stacks applied in a superconducting motor in different cooling conditions*, Journal of Physics: Conference Series 1559(1), 012088, 2020, ISSN: 1742-6588
IF: 0.540, MNiSW: 40
DOI: 10.1088/1742-6596/1559/1/012088

[H9] **Ł. Tomków**, N. Mineev, A. Smara, V. Climente-Alarcon, B.A. Głowacki: *Frequency-dependent demagnetisation rate of a shielded HTS tape stack*, Journal of Physics: Conference Series 1559(1), 012056, 2020, ISSN: 1742-6588
IF: 0.540, MNiSW: 40
DOI: 10.1088/1742-6596/1559/1/012056

[H10] F. Grilli, T. Benkel, M. Lao, T. Reis, E. Berberich, S. Wolfst, C. Schneider, P. Miller, C. Palmer, B. Głowacki, V. Climente-Alarcon, A. Smara, **Ł. Tomków**, J. Teigelk, A. Stock, J. Bu, L. Jeunesse, M. Staempfli, G. Delautre, B. Zimmermann, R. van der Woude, A. Perez, S. Samoilenkov, A. Molodyk, E. Pardo, M. Kapolka, S. Li, A. Dadhich, *Superconducting motors for aircraft propulsion: the Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project*, Journal of Physics : Conference Series 1559(1), 012051, 2020, ISSN: 1742-6588
IF: 0.540, MNiSW: 40
DOI: 10.1088/1742-6596/1590/1/012051

[H11] I. Harca, K. Machaj, **Ł. Tomków**, B.A. Głowacki: *Magnetic flux in stacks of superconducting tapes of different architecture*, Superconductor Science and Technology 33(11), 2020, ISSN: 1361-6668
IF: 3.067, MNiSW: 100
DOI: 10.1088/1361-6668/abb11c

[H12] **Ł. Tomków**, A. Smara, B.A. Głowacki: *Application of hot press bending for shaping a stack of HTS tapes operating as a trapped flux magnet*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 30(8), 2020, ISSN: 1051-8223
IF: 1.692 (2020), MNiSW: 70
DOI: 10.1109/TASC.2020.2994518

[H13] **Ł. Tomków**, I. Harca, K. Machaj, A. Smara, B.A. Głowacki: *Experimental system for testing a superconducting motor at temperatures close to 15 K*, Cryogenics 112, 103206, 2020, ISSN: 0011-2275
IF: 1.818 (2020), MNiSW: 100
DOI: 10.1016/j.cryogenics.2020.103206

[H14] **Ł. Tomków**, A. Smara, V. Climente-Alarcon, B.A. Głowacki: *Calculation of an optimal number of tapes in a stack of superconducting tapes subjected to a tilted magnetising field*, Acta Physica Polonica A 138(5), 737-739, 2020, ISSN: 0587-4246
IF: 0.579 (2020), MNiSW: 40
DOI: 10.12693/APhysPolA.138.737

[H15] V. Climente-Alarcon, A. Smara, **Ł. Tomków**, B.A. Głowacki, T. Reis: *Testing of Surface Mounted Superconducting Stacks as Trapped-Flux Magnets in a Synchronous Machine*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 30(5), 2020, ISSN: 1051-8223
IF: 1.692 (2020), MNiSW: 70
DOI: 10.1109/TASC.2020.2976603

[H16] E. Kulikov, G. Dorofeev, K. Kozłowski, **Ł. Tomków**, V. Drobin: *Complex research of the unclosed HTS shield for improving homogeneity of the magnetic field*, Journal of Physics: Conference Series, 1590, 012049, 2020, ISSN: 1742-6588
IF: 0.540, MNiSW: 40
DOI: 10.1088/1742-6596/1590/1/012049

[H17] **Ł. Tomków**: *Numerical study of thin superconducting plates subjected to transverse magnetic fields*, Proceedings of SPIE, Superconductivity and Particle Accelerators 2018, 11054G, 2019, ISSN: 0277-786X
IF: 0.56, MNiSW: 5
DOI: 10.1117/12.2525196

c) Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich ewentualnego wykorzystania

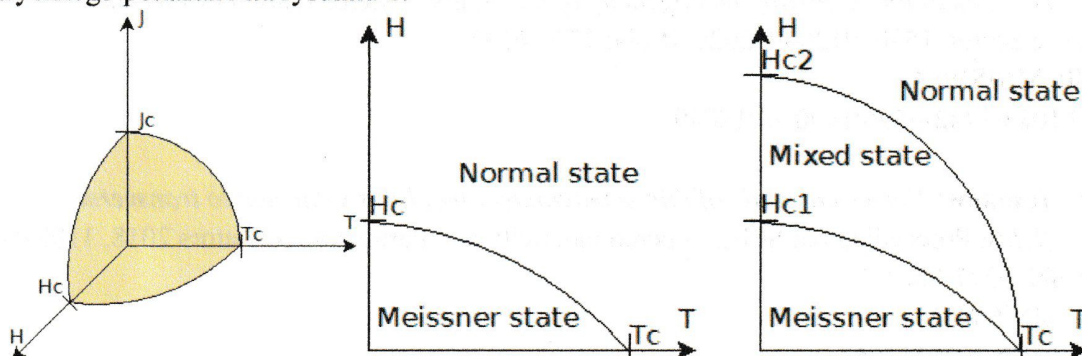
W skład przedłożonego osiągnięcia wchodzi cykl 17 artykułów w międzynarodowych i krajowych czasopismach naukowych.

Sumaryczny Impact Factor dla prac wymienionych w osiągnięciu naukowym wynosi 21,362, łączna liczba punktów wg klasyfikacji MNiSW to 975.

Wprowadzenie

Nadprzewodniki wykazują unikalne właściwości elektromagnetyczne, które mogą zostać wykorzystane do kontroli strumienia magnetycznego. Stan nadprzewodzący pojawia się, gdy trzy współzależne parametry – pole magnetyczne, temperatura i gęstość prądu elektrycznego – posiadają wartości poniżej krytycznych, zależnych od materiału. Parametry te tworzą płaszczyznę krytyczną pokazaną na rysunku 1. Strumień magnetyczny i nadprzewodnik mogą wchodzić ze sobą w skomplikowane interakcje.

Zależnie od rodzaju interakcji ze strumieniem magnetycznym materiały nadprzewodzące dzielone są na typ I i II. W przypadku nadprzewodników typu I poniżej płaszczyzny krytycznej nadprzewodnik znajduje się w stanie Meissnera - strumień magnetyczny jest całkowicie wypychany z objętości nadprzewodnika, a po jego powierzchni płyną prądy ekranujące. Dla odpowiednio niskich wartości pola magnetycznego nadprzewodniki typu II zachowują się tak samo. Po przekroczeniu pewnej wartości pola magnetycznego nazywanej pierwszym polem krytycznym, strumień magnetyczny zaczyna wnikać do objętości nadprzewodnika w formie fluksonów (kwantów strumienia magnetycznego) otoczonych wirem prądów ekranujących. Zależność pomiędzy krytycznym polem magnetycznym, a temperaturą dla określonej gęstości prądu elektrycznego pokazano na rysunku 1.



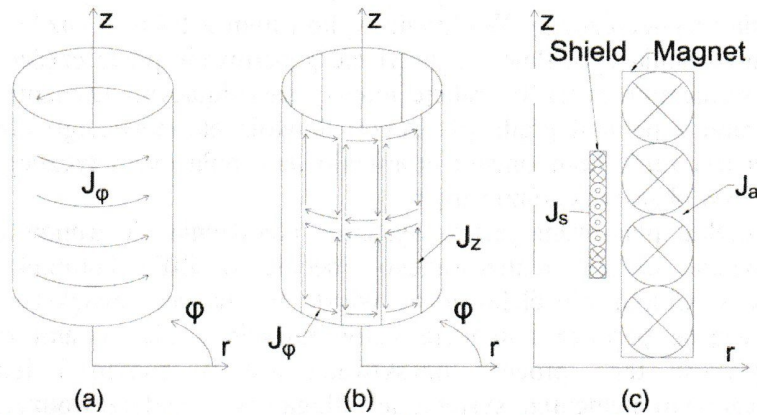
Rysunek 1. Płaszczyzna krytyczna nadprzewodnika i zależność krytycznego pola magnetycznego od temperatury dla nadprzewodników I i II typu.

Wraz z dalszym wzrostem zewnętrznego pola magnetycznego przekroczone może zostać drugie pole krytyczne, a nadprzewodnik przechodzi wtedy w stan normalny. Pole krytyczne nadprzewodników I typu i pierwsze pole krytyczne nadprzewodników II typu mają zwykle niskie wartości uniemożliwiające praktyczne zastosowanie. Z tego względu wszystkie powszechnie wykorzystywane obecnie nadprzewodniki należą do typu II.

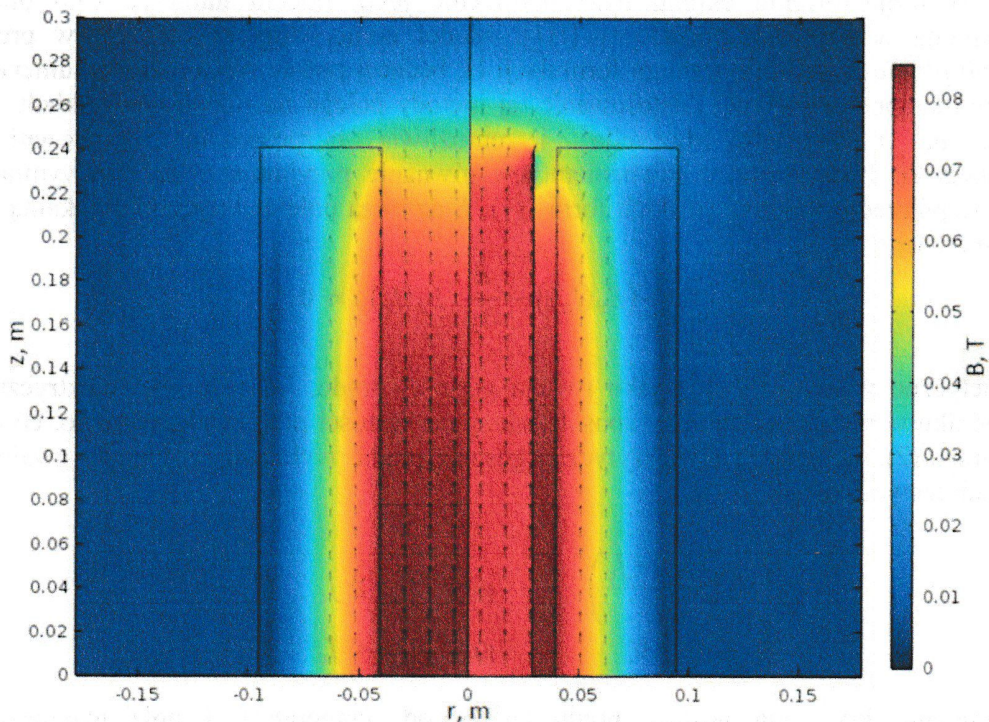
Obecność defektów w strukturze krystalicznej nadprzewodnika umożliwia pułapkowanie fluksonów. W skali makro objawia się to zatrzymaniem rozchodzenia strumienia magnetycznego. Zależnie od poziomu nasycenia nadprzewodnika polem magnetycznym może to oznaczać spułpkowanie strumienia (utworzenie quasi-stałego magnesu), bądź też efektywne ekranowanie pola. W swojej dotychczasowej pracy naukowej zajmowałem się zastosowaniami obydwu zjawisk.

Ekranowanie magnetyczne

Zatrzymanie rozchodzenia pola magnetycznego ma duże znaczenie w precyzyjnych pomiarach magnetycznych oraz w kontroli interakcji cząstek z polem magnetycznym. Może być dokonywane przez zatrzymanie strumienia magnetycznego (atenuacja) lub tylko wybranego komponentu pola w celu zwiększenia jednorodności pola magnetycznego (homogenizacja). Badania nad ekranowaniem strumienia magnetycznego były częścią mojej pracy naukowej podczas studiów doktoranckich [P1, P4]. Prace nad homogenizacją pola prowadziłem natomiast w kontekście zatrudnienia w Laboratorium Fizyki Wysokich Energii im. Wekslera i Baldina, będącego częścią Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej (ZIBJ), w ramach projektu 02-0-1065-2007/2017 „Nuclotron-NICA”.



Rysunek 2. Kierunek przepływu prądu w ekranie zamkniętym z litego nadprzewodnika (a), otwartym z taśm nadprzewodzących (b), efektywny prąd płynący w otwartym ekranie magnetycznym (c).



Rysunek 3. Wyznaczony numerycznie rozkład solenoidalnego pola magnetycznego bez homogenizującego ekranu (z lewej strony) i z jego zastosowaniem (z prawej strony) [H1].

Jednorodność pola magnetycznego jest szczególnie ważna w urządzeniach obrazowania medycznego, wpływając na rozdzielczość uzyskanego obrazu. Konwencjonalne rozwiązania obejmują zastosowanie wkładów, aktywne ekranowanie z wykorzystaniem małych cewek oraz odpowiednie kształtowanie cewek. Wykorzystanie ekranu z taśm nadprzewodzących może umożliwić stosunkowo tanie i łatwe ukształtowanie pola poprzez zatrzymanie komponentu pola magnetycznego prostopadłego do ich płaszczyzny. Numeryczną analizę prostego układu z płaskim nadprzewodnikiem reprezentującym taśmę w jednorodnym polu magnetycznym prostopadłym do powierzchni nadprzewodnika opisałem w [H17]. Analiza wykazała pojawienie się pętli prądu ekranującego zatrzymującego propagację pola magnetycznego. Zachowanie ekranu z taśmy (nazywanego otwartym) znacząco różni się od ekranu wykonanego z litego nadprzewodnika, jak pokazano na rysunku 2. dla przypadku ekranowania pola solenoidalnego.

W litym nadprzewodniku prąd ekranujący płynie dookoła ekranowanego obszaru zatrzymując propagację strumienia magnetycznego. W ekranie wykonanym z taśm w każdej taśmie pojawiają się dwie pętli prądu ekranującego. Pole magnetyczne generowane przez części pętli w kierunku osiowym znosi się wzajemnie przez interakcję między sąsiadującymi taśmami. Prowadzi to do wytworzenia się ekranu z pętlami prądu płynącymi dookoła ekranowanego obszaru w różnych kierunkach. Efektem jest zanik komponentu promieniowego pola magnetycznego i ujednoczenie komponentu osiowego w obszarze ekranowanym.

Zastosowanie tego efektu planowane jest w systemie chłodzenia elektronowego źródła jonów KRION. KRION będzie częścią realizowanego obecnie w ZIBJ kompleksu akceleratorów cząsteczkowych NICA. Chłodzenie elektronowe wiązki ma na celu zwiększenie jednorodności energii cząstek w wiązce poprzez interakcje kulombowskie z elektronami o znanej energii. Maksymalna efektywność tego procesu uzyskiwana jest w silnym i jednorodnym polu magnetycznym. Kluczowym elementem systemu jest długa cewka nadprzewodząca. By zmniejszyć wpływ niedokładności konstrukcyjnych, pomiędzy cewką, a obszarem interakcji umieszczony zostanie otwarty ekran magnetyczny zbudowany z taśm nadprzewodzących ułożonych wzdłuż osi magnesu dookoła obszaru ekranowanego¹.

Moją rolą w projektowaniu ekranu było stworzenie jego modelu numerycznego oraz jego eksperymentalna weryfikacja, opisane w [H1]. Model numeryczny stworzyłem w programie *Comsol Multiphysics* z wykorzystaniem formulacji H, będącej podstawową metodą numerycznego modelowania nadprzewodników. Zastosowanie tej metody polega na rozwiązaniu układu równań bazujących na równaniach Maxwella² i umożliwia bezpośrednie wyznaczenie pola magnetycznego H . Podstawowym równaniem jest równanie przyjmujące dla dwuwymiarowego układu we współrzędnych kartezjańskich formę (1). E oznacza pole elektryczne, J lokalną gęstość prądu elektrycznego.

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial H_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(E_z(J_z)) - \frac{\partial}{\partial y}(E_z(J_z)) = 0 \quad (1)$$

Pole magnetyczne wyznaczone jest jako rotacja gęstości prądu. Wartość pola elektrycznego w nadprzewodniku w wysoce nieliniowy sposób zależy od gęstości prądu elektrycznego, co opisane jest równaniem (2). J_c oznacza tutaj krytyczną gęstość prądu, wykładnik n określa gwałtowność przejścia nadprzewodzącego.

$$E_z = \begin{cases} E_0 \left(\frac{|J_z| - J_c}{J_c} \right)^n \frac{J_z}{|J_z|} & \text{gdy } |J_z| \geq J_c \\ 0 & \text{gdy } |J_z| < J_c \end{cases} \quad (2)$$

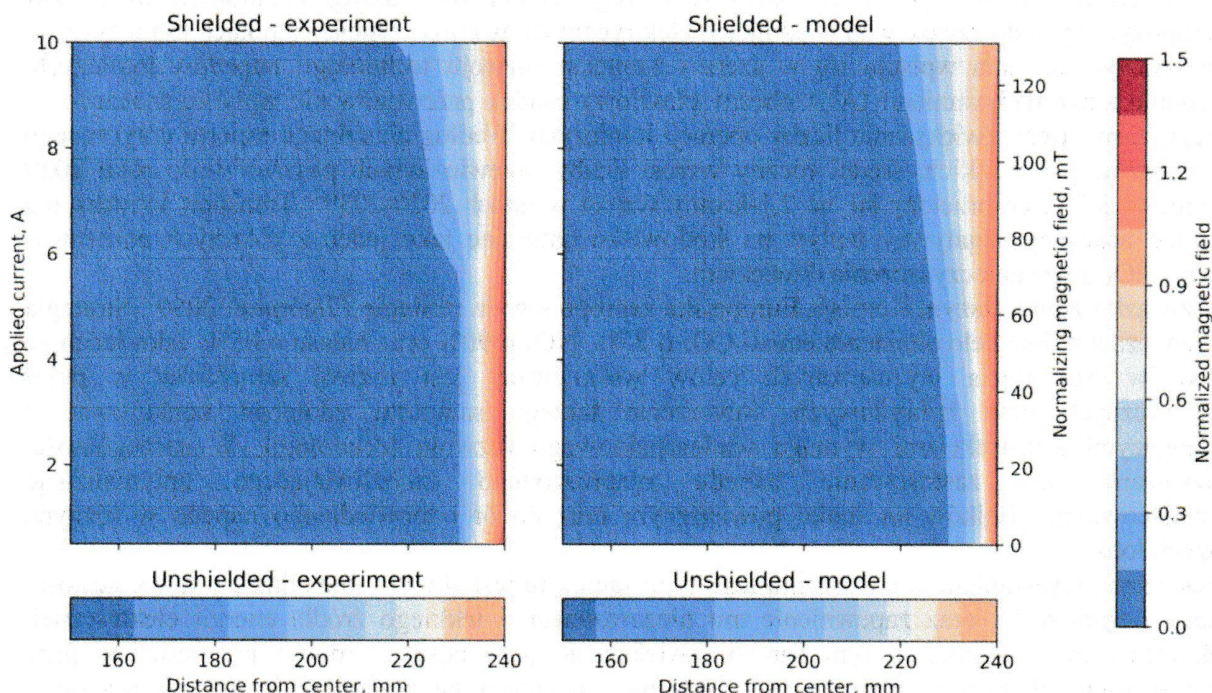
Jak wspomniano, krytyczna gęstość prądu zależy od temperatury i pola magnetycznego. Modelowania numerycznego ekranów nadprzewodzących dokonywałem z założeniem pracy w stałej temperaturze 77 K. Oczekiwana produkcja ciepła w ekranie jest pomijalna - pomiary przeprowadzane były w stałym (bądź bardzo powoli zmieniającym się) polu magnetycznym. Podobne warunki występować będą w układzie chłodzenia elektronowego. Założenie takie

upraszcza w pewnym stopniu obliczenia i pozwala uniknąć konieczności analizy przenoszenia ciepła w ekranie. Dodatkowym problemem jest występująca w taśmach nadprzewodzących zależność krytycznej gęstości prądu od kąta pomiędzy linią pola magnetycznego i płaszczyzną taśmy³, która znacząco wpływa na zdolność ekranującą taśmy.

Nieliniowość przejścia nadprzewodzącego stanowi znaczące wyzwanie w modelowaniu numerycznym. Nieodpowiedni dobór parametrów bądź kształtu siatki numerycznej może prowadzić do niestabilności. Dodatkowo, zastosowanie formulacji H wymaga modelowania całego układu (łącznie z obszarem na zewnątrz urządzenia) i jest bardzo wrażliwe na niewłaściwe, bądź nadmiernie uproszczone warunki brzegowe. W przypadku ekranu nadprzewodzącego szczególnym aspektem była skomplikowana geometria, widoczna na rysunku 3 pokazującym wyniki modelowania. W układzie tym występuje cewka o średnicy ok. 20 cm, z uzwojeniem grubości ok. 5 cm i długości ok. 50 cm. Ekran miał podobną długość, jednak grubość nadprzewodnika w taśmie to zaledwie ok. 1 μm . Taka geometria układu prowadzi do konieczności zastosowania dużej ilości mocno zniekształconych elementów w siatce numerycznej nałożonej na ekran.

Dzięki wykorzystaniu technik homogenizacji właściwości taśmy (założenie jednolitej, anizotropowej krytycznej gęstości prądu elektrycznego w całej jej szerokości) udało mi się uzyskać wyniki bliskie eksperymentalnym przy jednoczesnym uproszczeniu siatki numerycznej i przyspieszeniu obliczeń [H1]. Zastosowałem cylindryczny układ współrzędnych i modelowałem system w 2D dzięki zastosowaniu rozumowania przedstawionego na rysunku 2. Przyjąłem założenie, że tylko prąd płynący w kierunku kątowym wpływa na pole magnetyczne w modelowanym obszarze i że wkład pozostałych prądów wzajemnie się znosi. Dzięki temu możliwe było modelowanie taśmy jako pojedynczego obszaru nadprzewodzącego z nałożonym warunkiem sumarycznego prądu wynoszącego 0, co wymusiło tworzenie się układów prądu matematycznie równoważnych pętlom z rysunku 2b.

Rysunek 3. przedstawia przykładowy rozkład indukcji magnetycznej i jej kierunku będący wynikiem numerycznego modelowania układu z ekranem nadprzewodzącym. Pokazane jest porównanie pomiędzy polem nieekranowanym (lewa strona rysunku) i po homogenizacji z wykorzystaniem ekranu nadprzewodzącego. Zwiększenie jednorodności pola zarówno pod względem kierunku, jak i siły jest bardzo wyraźne.



Rysunek 4. Zbiorcze wyniki modelowania i pomiarów długiego ekranu nadprzewodzącego w solenoidalnym polu magnetycznym [H1].

Weryfikacja eksperymentalna dokonana została z wykorzystaniem układu z sondą Halla przesuwaną wzdłuż osi ekranu [H1]. Maksymalna zewnętrzna ekranowana indukcja magnetyczna w której dokonywano pomiarów wynosiła około 120 mT. Zbiorcze wyniki pomiarów eksperymentalnych i modelowania przedstawiono na rysunku. 4. Normalizująca indukcja magnetyczna oznacza maksymalną wartość indukcji w nieekranowanym układzie i definiuje prąd w elektromagnesie. Na podstawie wyników wyznaczyłem parametry do równań empirycznych, umożliwiających szybką estymację skuteczności ekranowania dla różnych wymiarów cewek, ekranów i siły pola magnetycznego.

Uzyskane wyniki pokazują spadek zdolności ekranu do homogenizacji pola magnetycznego wraz ze wzrostem jego wartości. Dla zapewnienia optymalnej pracy układu chłodzenia elektronowego, w którym ekranowana będzie indukcja magnetyczna o wartości ok. 200 mT konieczne jest zwiększenie zdolności ekranowania. W związku z tym planowane zastosowanie bardziej skomplikowanych ekranów z większą liczbą warstw taśm ułożonych w formie siatki [H16]. Badania nad technologią ekranów są nadal kontynuowane w ZIBJ.

Oprócz wykorzystania w układzie chłodzenia elektronowego proponowane ekrany mogą znaleźć również zastosowanie w urządzeniach obrazowania medycznego. Interesującym zastosowaniem jest również ochrona stosów taśm nadprzewodzących przed demagnetyzacją. Tematyka ta była częścią prac prowadzonych przeze mnie na Uniwersytecie w Cambridge i szczegółowo opisana jest w dalszej sekcji.

Pulapkowanie strumienia magnetycznego

Główna część wymienionych wyżej prac (H2 - H15) powstała w kontekście projektu ASuMED (*Advanced Superconducting Motor Demonstrator*) finansowanego przez europejski program Horyzont 2020 (nr 7231119). Projekt realizowany był przez międzynarodowe konsorcjum i miał na celu budowę w pełni nadprzewodzącego silnika elektrycznego w skali demonstracyjnej. Finansowanie badań pochodziło częściowo również z grantu EPSRC *Development of superconducting composite permanent magnets for synchronous motors: an enabling technology for future electric aircraft* nr EP/P000738/1, którego celem był rozwój technologii magnesów kompozytowych do zastosowań w silnikach elektrycznych, w szczególności silnikach lotniczych.

Prowadzone badania wpisują się w szerszy kontekst rozwoju technologii napędów lotniczych. Zgodnie z przewidywaniami IATA obecny chwilowy spadek przewozów nie wpłynie znacząco na długofalowy trend zwiększania liczby operacji lotniczych. Według aktualnego raportu dotyczącego przewozów pasażerskich, średni roczny wzrost liczby przewiezionych pasażerów do roku 2039 wyniesie 3,7%, co przełoży się na 2,1-krotny wzrost w latach 2020-2039⁴. Transport lotniczy ma bardzo znaczący negatywny wpływ na środowisko naturalne jako jeden z głównych emitentów CO₂ i NO_x oraz zanieczyszczenia dźwiękiem.

W związku z powyższym Komisja Europejska zaproponowała strategię *Flightpath 2050*⁵. Strategia wyznacza ambitne cele obniżenia emisji CO₂ o 75%, NO_x o 90% oraz hałasu o 65%. Jako jeden ze środków osiągnięcia wyznaczonych celów wskazywany jest rozwój samolotów w pełni elektrycznych oraz hybrydowych. Stworzenie takiego samolotu zdolnego konkurować z istniejącymi konstrukcjami wymaga wieloaspektowego rozwoju technologii. W szczególności rozważane jest zastosowanie napędu rozproszonego umożliwiającego optymalizację umiejscowienia silników na statku powietrznym oraz dobór odpowiedniego napędu w różnych fazach lotu.

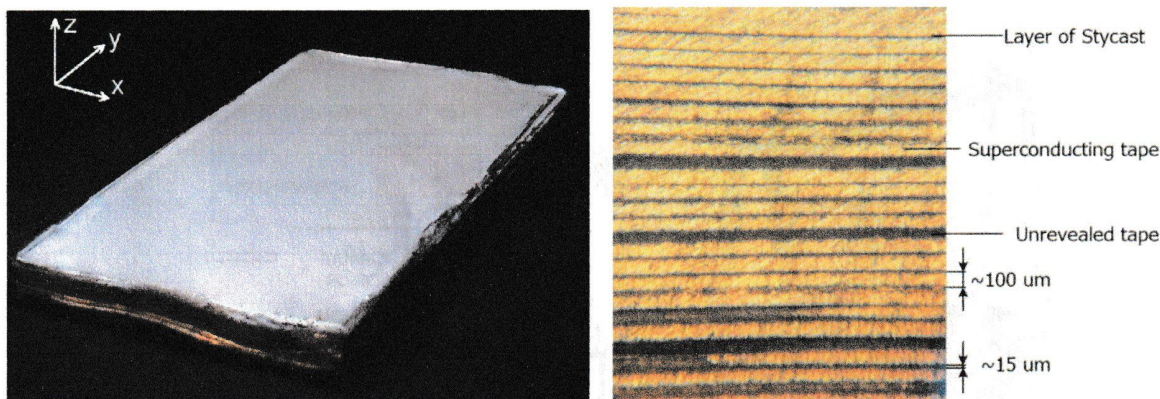
Znaczącym wyzwaniem w stworzeniu tego typu samolotu jest zbudowanie silnika o dużej gęstości mocy i sprawności oraz zapewnienie mu niezawodnego i lekkiego źródła energii elektrycznej. Obniżenie masy silnika (a tym samym zwiększenie jego gęstości mocy) jest możliwe przy zastosowaniu elementów nadprzewodzących pozwalających na przenoszenie dużych prądów i uzyskiwanie wysokich pól magnetycznych. Źródłem energii elektrycznej w tym przypadku mają być ogniwa paliwowe zasilane wodorem. Wodór składowany w postaci ciekłej ma bardzo wysoką

masową gęstość energii chemicznej i może być wykorzystywany jako chłodziwo nadprzewodników w silniku, umożliwiając utrzymywanie ich poniżej temperatury krytycznej.

Demonstrator budowany przez konsorcjum ASuMED, którego ogólny opis zawarty jest w [H10], ma być pierwszym w pełni nadprzewodzącym silnikiem synchronicznym zbudowanym w dużej skali. Planowane jest osiągnięcie mocy 1 MW przy masie 50 kg, przekładające się na gęstość mocy wynoszącą 20 kW/kg. Najlepsze obecnie stosowane konwencjonalne silniki elektryczne osiągają gęstość mocy wynoszącą około 12 kW/kg.⁶ W silniku zastosowano chłodzony ciekłym wodorem stojan z nadprzewodników wysokotemperaturowych wykorzystujący układ kapilar do dostarczania chłodziwa. Unikalną cechą silnika ASuMED jest użycie stosów taśm nadprzewodzących pułapkujących strumień magnetyczny jako magnesów stałych w wirniku. Zastosowanie takich stosów umożliwia spułpkowanie strumienia magnetycznego o gęstości dochodzącej do 17,7 T.⁷

Zaprojektowanie, produkcja, charakteryzacja oraz montaż stosów taśm nadprzewodzących w wirniku silnika było odpowiedzialnością Grupy Nadprzewodnictwa Stosowanego i Kriogeniki na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Uniwersytetu w Cambridge, której byłem członkiem. Cele wyznaczone Grupie zostały zrealizowane. Moją rolą w realizacji projektu było przeprowadzenie analizy cieplnej i elektromagnetycznej koniecznej do zaprojektowania stosów, przeciwdziałanie problemowi demagnetyzacji oraz stworzenie metod produkcji stosów i ich rzeczywiste wykonanie.

Rysunek 5. przedstawia fotografie płaskiego stosu taśm nadprzewodzących. Do produkcji stosu wykorzystano 50 taśm nadprzewodzących, których powierzchnie skleiono żywicą Stycast 1266. Taśmy zostały wyprodukowane przez firmę Deutsche Nanoschicht, mają szerokość 40 mm i grubość około 100 μm . Materiałem nadprzewodzącym jest GdBCO, substratem zaś stop Ni-W. Taśmy tego typu stosowane były w większości prezentowanych badań.



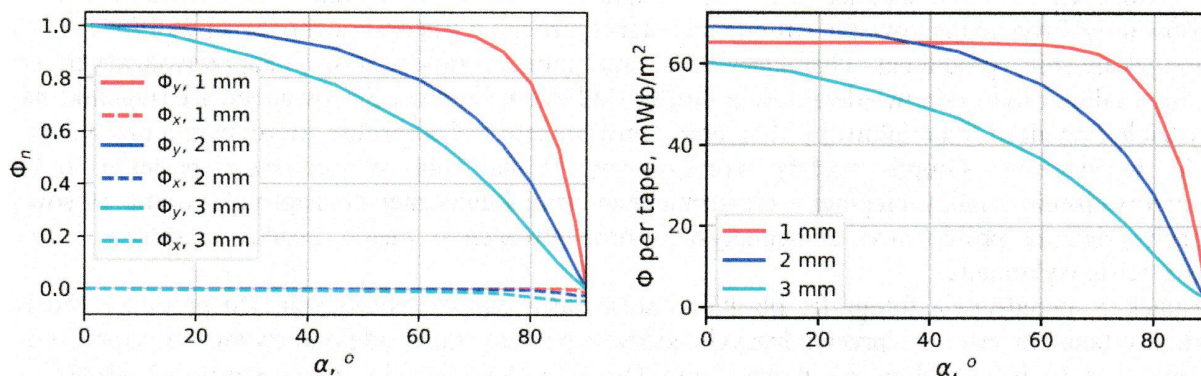
Rysunek 5. Z lewej - fotografia płaskiego stosu taśm nadprzewodzących z oznaczeniami osi stosowanymi w tekście [H11], z prawej – fotografia mikroskopowa przekroju stosu.

Charakteryzacja elektromagnetyczna

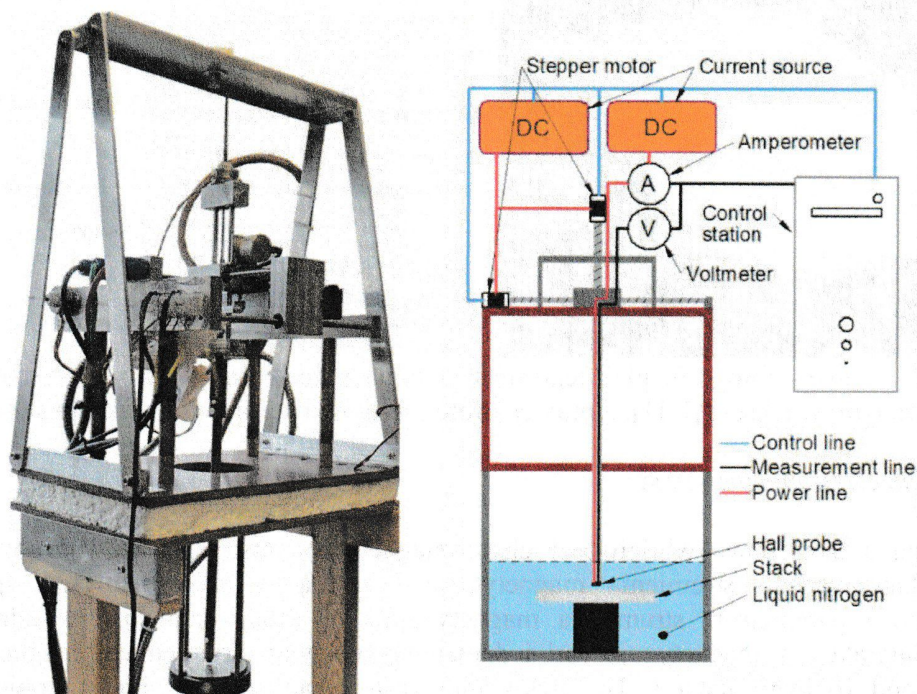
Ze względu na anizotropowe właściwości elektromagnetyczne taśm nadprzewodzących, siła i kierunek spułpkowanego strumienia magnetycznego zależą w skomplikowany sposób od geometrii stosu i parametrów strumienia magnetyzującego. Stosy działające w silniku będą wchodzić w interakcję z magnetyzującymi i demagnetyzującymi strumieniami magnetycznymi, działającymi pod różnymi kątami. By efektywnie zastosować stos w silniku konieczne jest zrozumienie jego zachowania w różnych warunkach. Pierwszym etapem projektowania stosu było przeprowadzenie numerycznej i eksperymentalnej analizy zachowania pojedynczego stosu opisanej w [H2].

Analizowałem płaskie stosy o różnej grubości (liczbie taśm), magnetyzowane przez strumień działający pod różnymi kątami względem osi z stosu (oznaczenie zgodnie z rysunkiem 5). W modelu numerycznym, podobnie jak w przypadku ekranów magnetycznych, zastosowałem

formulację H . Stworzyłem dwuwymiarowy model przekroju stosu magnetyzowanego przez strumień magnetyczny generowany przez dwa równoległe obszary o przepisanej gęstości prądu reprezentujące elektromagnes i umożliwiające uzyskanie realistycznego rozkładu pola. Modelowana gęstość prądu była podnoszona od zera do zadanej wartości generującej indukcję magnetyczną o sile 113 mT, odpowiadającej wartości uzyskiwanej podczas eksperymentów. Po uzyskaniu tej wartości była utrzymywana przez czas pozwalający na relaksację, a następnie zredukowana do zera. Na podstawie uzyskanego rozkładu indukcji magnetycznej wyznaczyć można wartość splełkowanego strumienia poprzez całkowanie jego gęstości po powierzchni stosu. Uzyskiwany był również rozkład gęstości prądu w stosie.



Rysunek 6. Wyniki modelowania numerycznego pojedynczego stosu - komponenty strumienia magnetycznego znormalizowane do maksymalnej wartości (lewa strona), średnia gęstość strumienia magnetycznego na taśmie w stosie (prawa strona) [H2].



Rysunek 7. Układ skanowania z sondą Halla [H2, H11, H14].

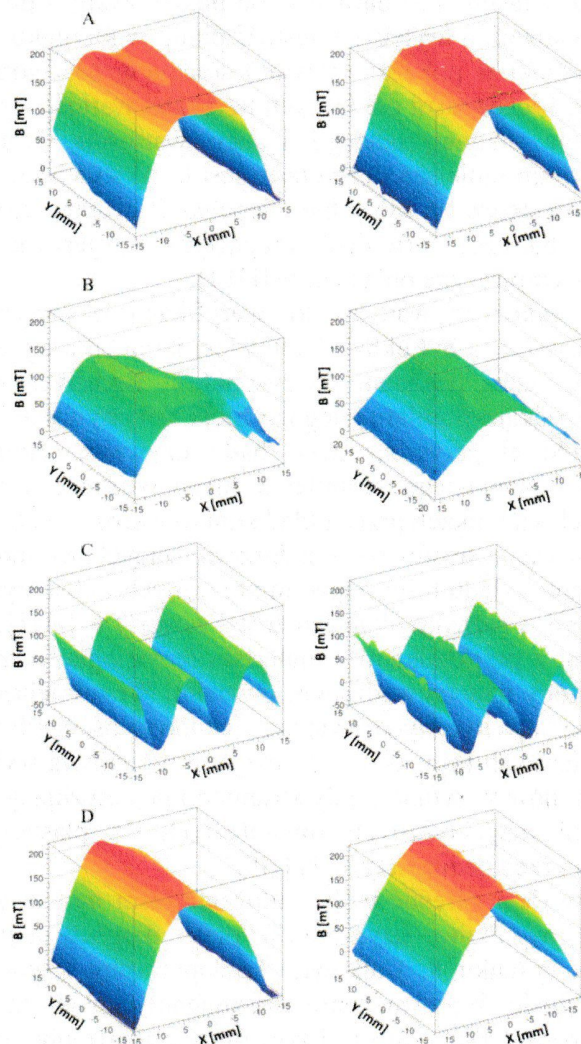
Wyniki uzyskane z wykorzystaniem modelu zostały pokazane na rysunku 6. Kierunek splełkowanego strumienia magnetycznego w znacznym stopniu definiowany jest przez ułożenie taśmy. Słabo natomiast zależy od kąta strumienia magnetyzującego, szczególnie dla stosów zawierających mniejszą liczbę taśm. Strumień magnetyzujący równoległy do powierzchni

krystalicznej nadprzewodnika w taśmie jest bardzo słabo pułapkowany - prądy w nadprzewodniku nie mogą płynąć pomiędzy taśmami, a krytyczna gęstość prądu w kierunku z jest znacząco niższa, niż w płaszczyźnie $x-y$. Na rysunku 6. pokazano również średnią gęstość strumienia w przeliczeniu na pojedynczą taśmę w stosie. Liczba taśm dla których uzyskana wartość jest maksymalna zmienia się wraz z kątem strumienia magnetyzującego i jego wartością. Dla słabszych strumieni działających pod większym kątem mniejsza liczba taśm jest korzystniejsza. W przypadku gdy stos zawiera zbyt dużo taśm ich magnetyzacja może być niepełna. Z drugiej strony, jeżeli stos zawiera mniej taśm niż optymalna liczba, część strumienia magnetycznego jest marnowana. Analizę tego efektu i wyprowadzone wzory empiryczne opisałem w [H14].

Podstawowym narzędziem wykorzystywanym do weryfikacji eksperymentalnej uzyskanych wyników modelowania numerycznego był układ skanowania indukcji magnetycznej z sondą Halla, którego zdjęcie wraz ze schematem pokazano na rysunku 7. Badany stos umieszczany jest w uchwycie. W zależności od rodzaju pomiaru magnetyzacja dokonywana jest z wykorzystaniem cewki będącej częścią układu eksperymentalnego bądź używając silniejszego zewnętrznego elektromagnesu. Gęstość spułpkowanego strumienia magnetycznego jest następnie mierzona sondą Halla poruszaną w trzech kierunkach przez układ silników krokowych.

Jedną z głównych zalet zastosowania stosów taśm nadprzewodzących jest możliwość wpływania na ich właściwości poprzez zmiany układu taśm. Opis numerycznych i eksperymentalnych badań nad magnetyzacją stosów z taśmami w różnych układach został zawarty w [H11]. Badano cztery stosy - podstawowy z szerokich taśm, z przekładkami z materiału ferromagnetycznego, złożony z trzech sekcji z wąskich taśm i otoczony nadprzewodzącym ekranem. Wcześniejsze badania sugerują, że zastosowanie przekładek ferromagnetycznych zwiększa jednorodność spułpkowanego strumienia magnetycznego⁸. Ułożenie węższych taśm w stos z sekcjami umożliwia wykorzystanie tańszych i prostszych w produkcji materiałów w sytuacji, gdy strumień magnetyzujący jest stosunkowo słaby [H7]. Ekranowanie strumieni magnetycznych równoległych do płaszczyzny taśm ma duże znaczenie przy ochronie stosu przed demagnetyzacją [H9].

Wyniki opisane w [H11] pozwalają określić wpływ ułożenia taśm na ich zdolność pułpkowania strumienia stosu. Przykład wyników uzyskanych przy magnetyzacji pulsem strumienia magnetycznego pokazano na rysunku 8. Całkowity spułpkowany strumień i jego gęstość są najwyższe w standardowym stosie. Wprowadzenie ferromagnetycznych przekładek doprowadziło do zmniejszenia ilości nadprzewodnika w stosie i tym samym obniżenia zdolności pułpkowania strumienia magnetycznego. Podobnie, rozdzielenie stosu na sekcje zmniejsza wielkość pętli prądu utrzymującej strumień magnetyczny. Zastąpienie części stosu ekranem ma niewielki negatywny wpływ na spułpkowany strumień. Uzyskane wyniki eksperymentalne i numeryczne są zgodne. Widoczne różnice wynikają głównie z drobnych defektów taśm w stosach prowadzących do niejednorodnego pułpkowania. Zbadane modyfikacje stosów wpływają negatywnie na zdolność pułpkowania strumienia magnetycznego. W praktyce inżynierskiej jednak nie zawsze możliwe jest zastosowanie stosu z szerokich taśm i konieczne może okazać się wykorzystanie innych konfiguracji.



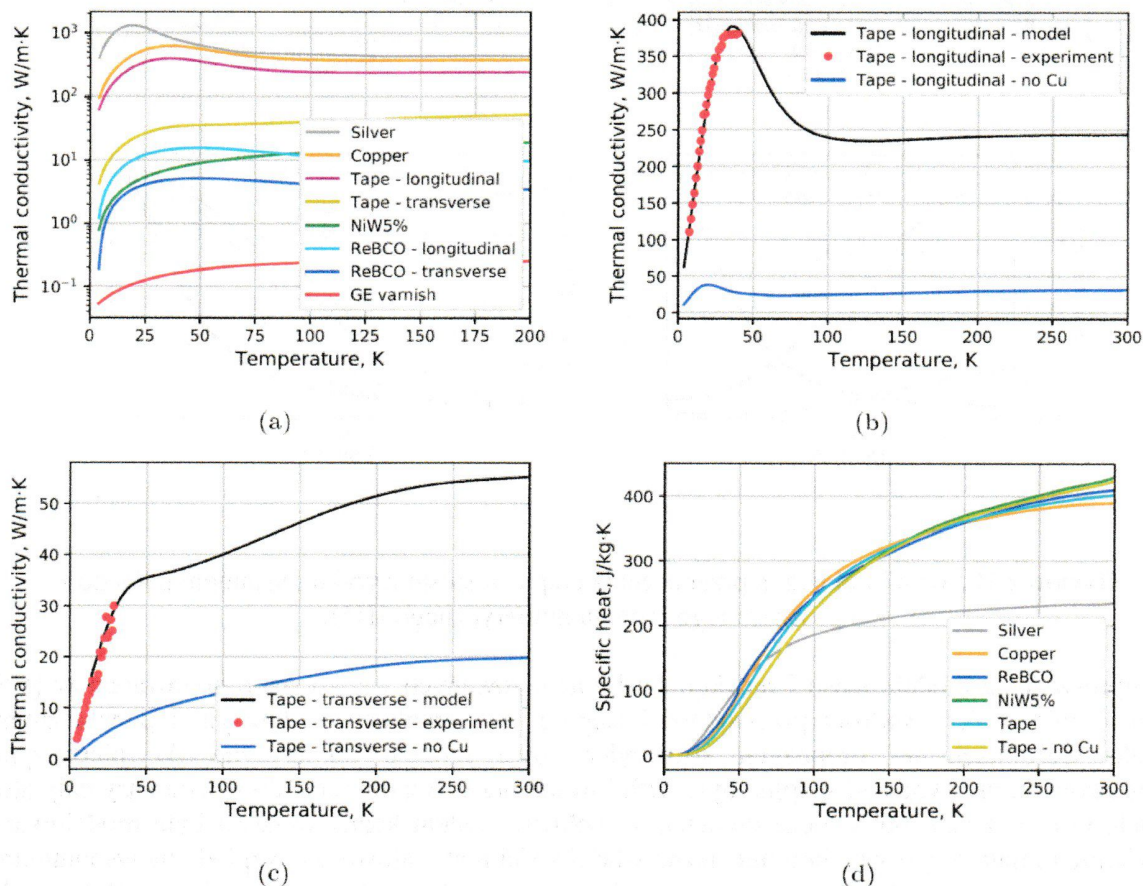
Rysunek 8. Wyniki pomiarów i obliczeń magnetyzacji stosów o różnej geometrii. A - standardowy stos, B - stos z ferromagnetycznymi przekładkami, C - stos podzielony na sekcje, D - stos z otwartym ekranem magnetycznym; lewa kolumna - wyniki pomiarów eksperymentalnych, prawa - wyniki modelowania numerycznego [H11].

Opisane metody charakteryzacji elektromagnetycznej umożliwiły przeprowadzenie analizy zachowania stosów przy zastosowaniu w silniku elektrycznym i zaprojektowanie jego wirnika. Przy jego projektowaniu rozważane były trzy możliwości umocowania i ukształtowania stosów. Pierwszą możliwością, opisaną w [H15] jest umieszczenie stosu bezpośrednio na powierzchni wirnika. Przy takiej konfiguracji magnetyzacja stosu jest bardzo efektywna i uzyskiwany jest duży spuląpkowany strumień. W [H15] opisane są badania eksperymentalne prowadzone w realistycznych warunkach działania stosu, gdzie magnetyzacja realizowana jest z użyciem uzwojenia stojana. Eksperymenty realizowane były w temperaturze ciekłego azotu, a wirnik był obracany z wykorzystaniem silnika krokowego. Mierzony było napięcie indukowane w uzwojeniu stojana. Zasadniczym problemem w takim układzie jest ekspozycja stosu na demagnetyzujący strumień magnetyczny działający równolegle do powierzchni taśmy. Drugą możliwością, opisaną w [H4] i [H6] jest umieszczenie stosów jako biegunów utajonych pomiędzy płatkami wirnika. Wówczas stos jest dobrze chroniony przed demagnetyzacją, jednakże efektywność procesu magnetyzacji znacząco się obniża. Ostatecznie wybrano rozwiązanie kompromisowe, w którym stos o przekroju w kształcie litery C jest chroniony przez odpowiednio ukształtowane płatki wirnika.

Charakteryzacja cieplna

Z punktu widzenia przenoszenia ciepła taśmy są strukturami wysoce anizotropowymi. Składają się z kilku warstw w płaszczyznach $x-y$ układających się wzdłuż osi z , zgodnie z oznaczeniami na rysunku 5. Najgrubszą warstwą w pokazanej taśmie jest substrat grubości około $75\ \mu\text{m}$. Na substracie umieszczone są liczne warstwy zapewniające kompatybilność chemiczną o łącznej grubości poniżej $0,5\ \mu\text{m}$, umożliwiające prawidłowe ułożenie kryształów nadprzewodnika. Właściwa warstwa nadprzewodząca ma grubość zaledwie ok. $1\ \mu\text{m}$. Całość pokryta jest z obu stron srebrnym stabilizatorem. Poszczególne warstwy charakteryzują się różną przewodnością cieplną w zakresie 4 rzędów wielkości, jak pokazano na rysunku 9a. W związku tym przewodność cieplna w kierunku z jest znacząco różna niż w płaszczyźnie $x-y$.

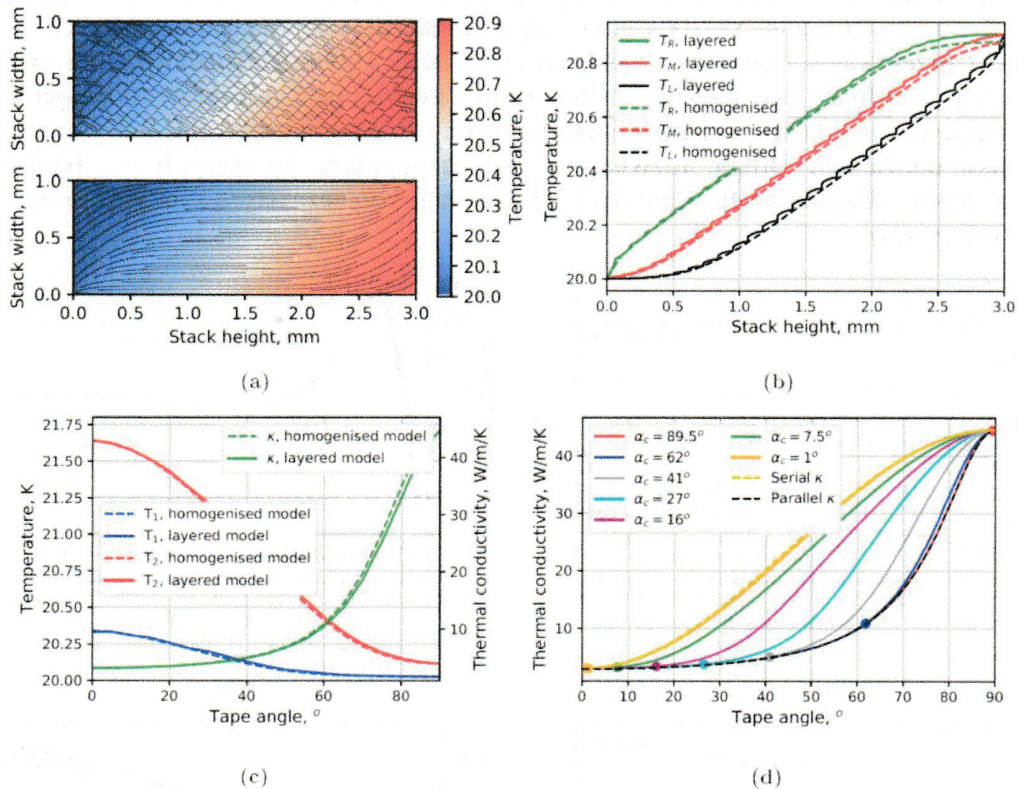
Celem przeprowadzonej przeze mnie analizy opisanej w [H5] było wyznaczenie parametrów potrzebnych do modelowania przenoszenia ciepła w stosie taśm nadprzewodzących – ciepła właściwego i przewodności cieplnej. Podstawową kwestią w tym przypadku było sprawdzenie założenia, czy możliwe jest cieplne modelowanie stosów jako obiektów homogenicznych, charakteryzujących się właściwościami anizotropowymi, czy też konieczne jest traktowanie każdej warstwy jako oddzielnej. Drugie rozwiązanie jest niepożądane ze względu na bardzo duże wymagania mocy obliczeniowej i pamięci operacyjnej koniecznych do modelowania nawet najmniejszych stosów.



Rysunek 9. Właściwości cieplne taśm nadprzewodzących i materiałów wchodzących w ich skład [H5].

Jako punkt odniesienia mojej analizy przyjąłem wyniki badań eksperymentalnych dotyczących przewodności cieplnej pojedynczych taśm nadprzewodzących dokonane przez M. Bonurę i C. Senatore w kierunku wzdłuż taśmy⁹ i w poprzek¹⁰. Pomiary te oznaczone są na rysunku 9b (wzdłuż) i 9c (w poprzek) jako czerwone punkty. Analityczne wyznaczenie przewodności cieplnej

wielowarstwowej taśmy przeprowadzane jest w sposób analogiczny do obliczania obwodu elektrycznego. W kierunku poprzecznym przewodności cieplne dodają się tak jak w obwodzie szeregowym, natomiast w kierunku wzdłużnym – jak w obwodzie równoległym. W obliczeniach zastosowane zostały właściwości poszczególnych materiałów w funkcji temperatury pokazane na rysunku 9a. Przy odpowiednim doborze RRR miedzi (przepływ ciepła przez tę warstwę dominuje w kierunku wzdłużnym) uzyskiwane są wyniki bardzo bliskie eksperymentalnym w oczekiwanej temperaturze pracy stosu. Pojemność cieplna taśmy i stosu wyznaczana jest jako średnia ważona tego parametru (względem wkładu do całkowitej masy) dla poszczególnych składników, zgodnie z zależnościami pokazanymi na Rys. 9d. W przypadku stosów anizotropia przewodności cieplnej jest dodatkowo wzmocniona obecnością warstw żywicy sklejającej taśmy i działającej jak izolator cieplny.



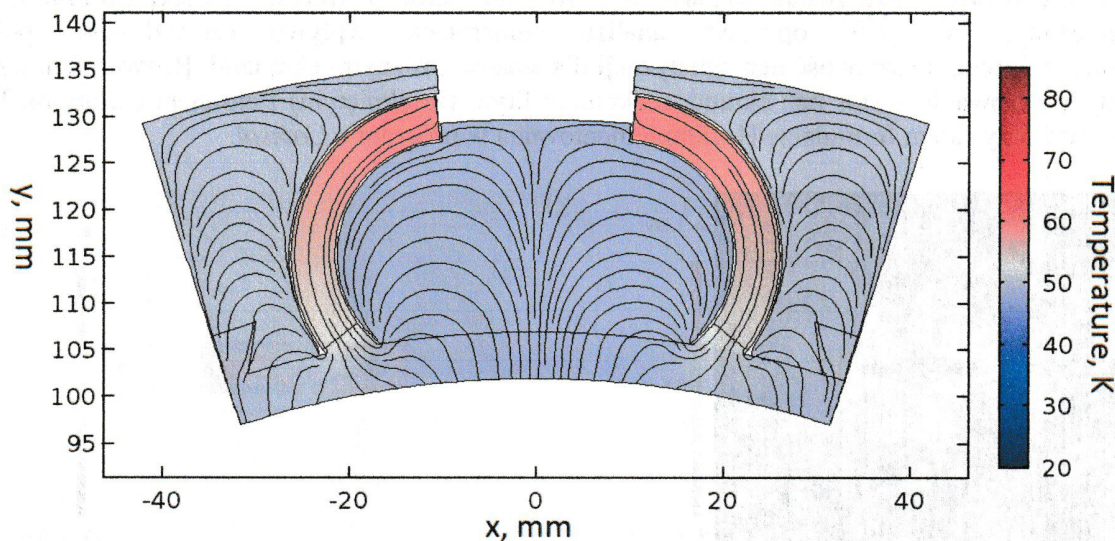
Rysunek 10. Wyniki obliczeń przenoszenia ciepła w stosie z wykorzystaniem pełnego i uproszczonego modelu numerycznego [H5].

Dla uproszczenia modelu stosu i redukcji liczby analizowanych warstw zaproponowałem w [H5] zastosowanie dwóch wartości przewodności cieplnej w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym. W celu weryfikacji tej propozycji stworzyłem dwa modele numeryczne. W pierwszym, uproszczonym, przewodność cieplna była definiowana przez wspomniane dwa parametry cały stos modelowany był jako pojedyncza domena. W pełnym modelu każda warstwa była modelowana oddzielnie i miała przypisane homogeniczne właściwości materiałowe. Ze względu na wspomniane ograniczenia mocy obliczeniowej i pamięci w przypadku pełnego modelu możliwe było modelowanie stosu o maksymalnej długości tylko 3 mm. Analizowane były również różne kąty pochylenia taśm. Siatka numeryczna w pełnym modelu zawierała 520000 elementów, natomiast w modelu uproszczonym tylko 1300. Czas obliczeń dla modelu pełnego wynosił 40 minut, zaś dla modelu uproszczonego 6 sekund, świadcząc o wadze uproszczenia modelowanego obiektu dla praktycznej możliwości jego analizy numerycznej.

Jako warunki brzegowe w obu modelach przyjąłem pewną wartość strumienia ciepła na jednym końcu stosu i stałą temperaturę na drugim. Następnie z wykorzystaniem standardowych równań

przepływu ciepła wyznaczałem rozkład temperatury i kierunek przepływu ciepła. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 10. Uzyskane rozkłady temperatury pokazane na rysunku 10a. są bardzo podobne dla obu modeli. Pewne różnice pojawiają się w kierunku przepływu ciepła. W pełnym modelu widoczne jest zygzakowanie wynikające z preferowanego kierunku przepływu wzdłuż warstw o wyższej przewodności cieplnej. Na rysunku 10b. pokazano wartości temperatur wzdłuż krawędzi i linii środkowej stosu, które również są podobne dla obu modeli. Na podstawie wartości temperatur odczytanych w obszarze, gdzie gradient temperatury jest stały (bądź bliski stałemu) pokazanych na rysunku 10c., wyznaczyłem wartości przewodności cieplnej (pokazane na tym samym rysunku), uzyskując znaczącą zbieżność. W ten sposób udało się wykazać znaczące podobieństwo uzyskanych wyników i możliwość stosowania uproszczonych modeli cieplnych w projektowaniu stosów.

Dodatkowym wynikiem opisanym w pracy jest uogólnienie przewodności cieplnej jako funkcji geometrii stosu opisywanego dwoma parametrami. Pierwszym jest kąt krytyczny stosu definiowany jako minimalny kąt, przy którym pojedyncza taśma łączy dwa końce stosu (czyli rosnący wraz ze wzrostem stosunku pomiędzy długością, a szerokością stosu). Drugim jest kąt pomiędzy taśmami w stosie, a płaszczyzną jego podstawy. Wyniki numeryczne umożliwiły wykazanie, że gdy kąt taśm w stosie jest niższy, niż kąt krytyczny wartość efektywnej przewodności cieplnej znajduje się na krzywej opisananej przez szeregowy układ oporów cieplnych. Po przekroczeniu tej wartości wielkość przewodności cieplnej zaczyna zbliżać się do wartości opisananej równoległym układem oporów.



Rysunek 11. Rozkład temperatury i przepływu ciepła w sekcji wirnika z dwoma stosami nadprzewodzącymi [H8].

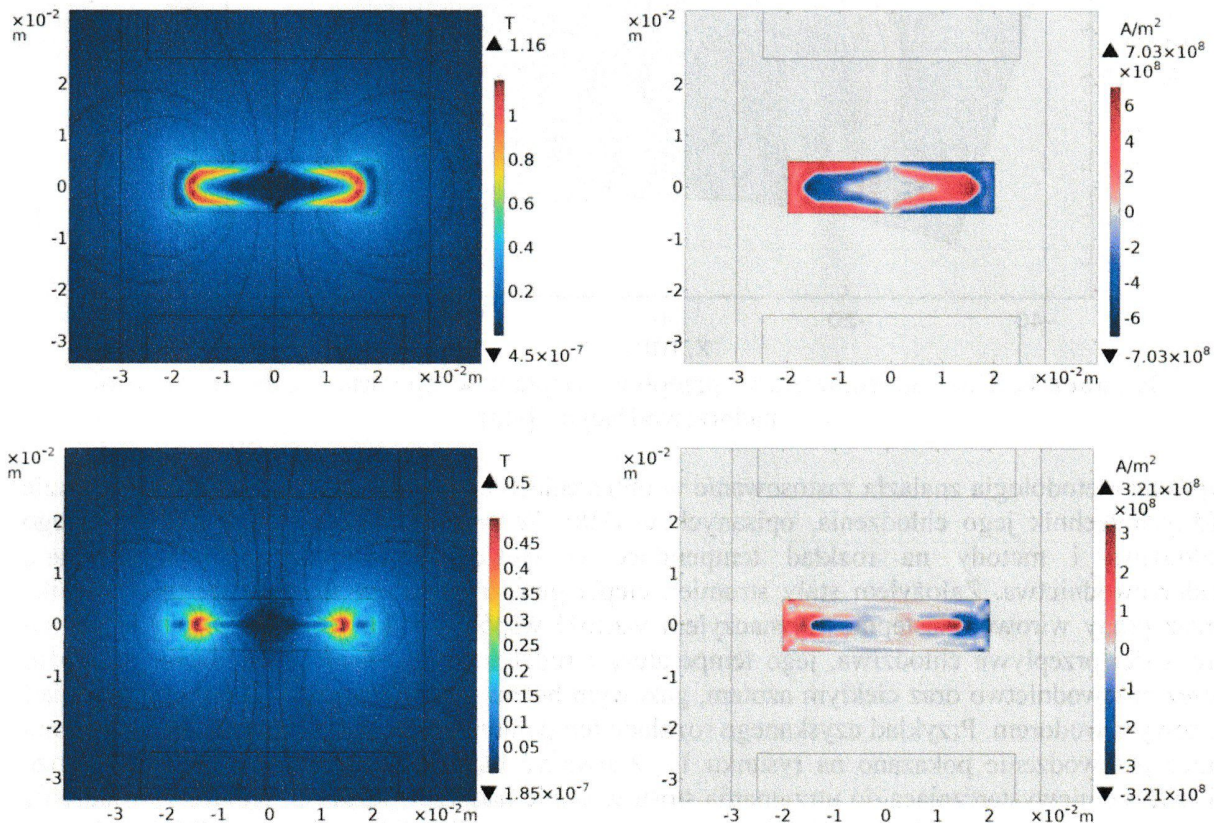
Opisana metodologia znalazła zastosowanie w obliczeniach cieplnych stosu i wirnika oraz analizie różnych technik jego chłodzenia, opisanych w [H8]. W pracy badałem wpływ zastosowanego chłodziwa i metody na rozkład temperatury w stosie i możliwość wyjścia ze stanu nadprzewodnictwa. Założyłem stały strumień ciepła generowanego w stosie i objętości wirnika przez prądy wirowe. Następnie wyznaczyłem wartość współczynnika wnikania ciepła w funkcji prędkości przepływu chłodziwa, jego temperatury i rodzaju. Analizowałem chłodzenie w próżni przez przewodnictwo oraz ciekłym azotem, gazowym helem przepływającym z różną prędkością i gazowym wodorem. Przykład uzyskanego rozkładu temperatur i kierunku przepływu dla chłodzenia przez przewodzenie pokazano na rysunku 11. Zauważyć można, że ta metoda chłodzenia może okazać się niewystarczająca do utrzymania stosu w stanie nadprzewodzącym. Kluczowe znaczenie ma tutaj połączenie cieplne pomiędzy stosiem, a wirnikiem. Wyniki uzyskane w [H8] wykazały konieczność zastosowania indowej kotwicy cieplnej w miejscu połączenia stosu z wirnikiem.

Problem demagnetyzacji

Wspomniany już problem demagnetyzacji jest obecnie jedną z głównych barier zastosowania nadprzewodników w maszynach elektrycznych. Spuławkowany strumień magnetyczny utrzymywany jest przez układ prądów w nadprzewodniku. Ekspozycja nadprzewodnika na zewnętrzny strumień magnetyczny w kierunku innym niż spuławkowany prowadzi do zmiany tego układu. W konsekwencji spuławkowany strumień zostaje osłabiony bądź całkowicie zanika¹¹. Dla pracującej maszyny elektrycznej takie zachowania oznacza postępujący spadek mocy maszyny. W związku z tym konieczne okazało się lepsze zrozumienie procesu demagnetyzacji i poszukiwanie rozwiązania tego problemu.

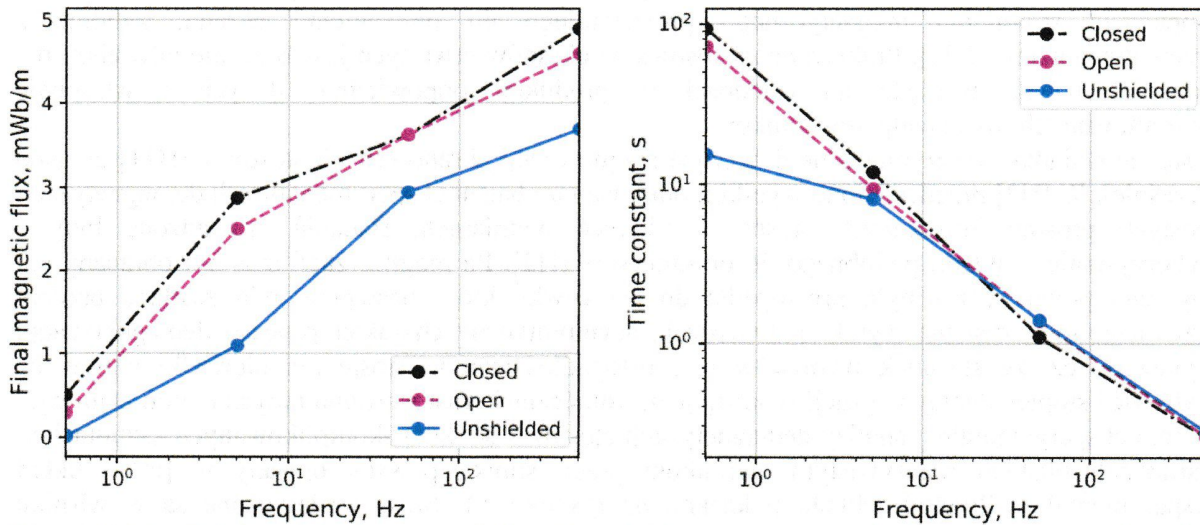
Rozważanych jest kilka metod ochrony stosów przed demagnetyzacją. Podstawową metodą, zastosowaną w prototypie ASuMED, jest nadanie odpowiedniego kształtu stosom. Dzięki temu, jak opisano wcześniej, stosy chronione są przed strumieniem demagnetyzującym przez elementy wirnika. Rozwiązanie takie obniża jednak możliwy do spuławkowania strumień i utrudnia produkcję stosów. Innym sposobem jest remagnetyzacja stosów w czasie pracy silnika. Implikuje to jednak znaczącą zmienność mocy silnika w czasie. Dodatkowo, remagnetyzacja jest dość ryzykownym procesem, co jest szczególnie niepożądane w przypadku silnika napędzającego pojazd lotniczy. Przeprowadzone zostały również badania sugerujące, że połączenie elektryczne dwóch taśm zmniejsza efekt demagnetyzacji¹².

Do ochrony stosów może zostać wykorzystany również, opisany wcześniej, efekt ekranowania magnetycznego. W [H9] opisałem analizę numeryczną wpływu częstotliwości pola demagnetyzującego na szybkość demagnetyzacji dla stosów z różnymi ekranami. Rozważałem trzy warianty ekranowania – stos bez ekranu, z ekranem litym (zamkniętym) i ekranem otwartym. W analizie wykorzystałem formułację H zaimplementowaną w programie *Comsol*.

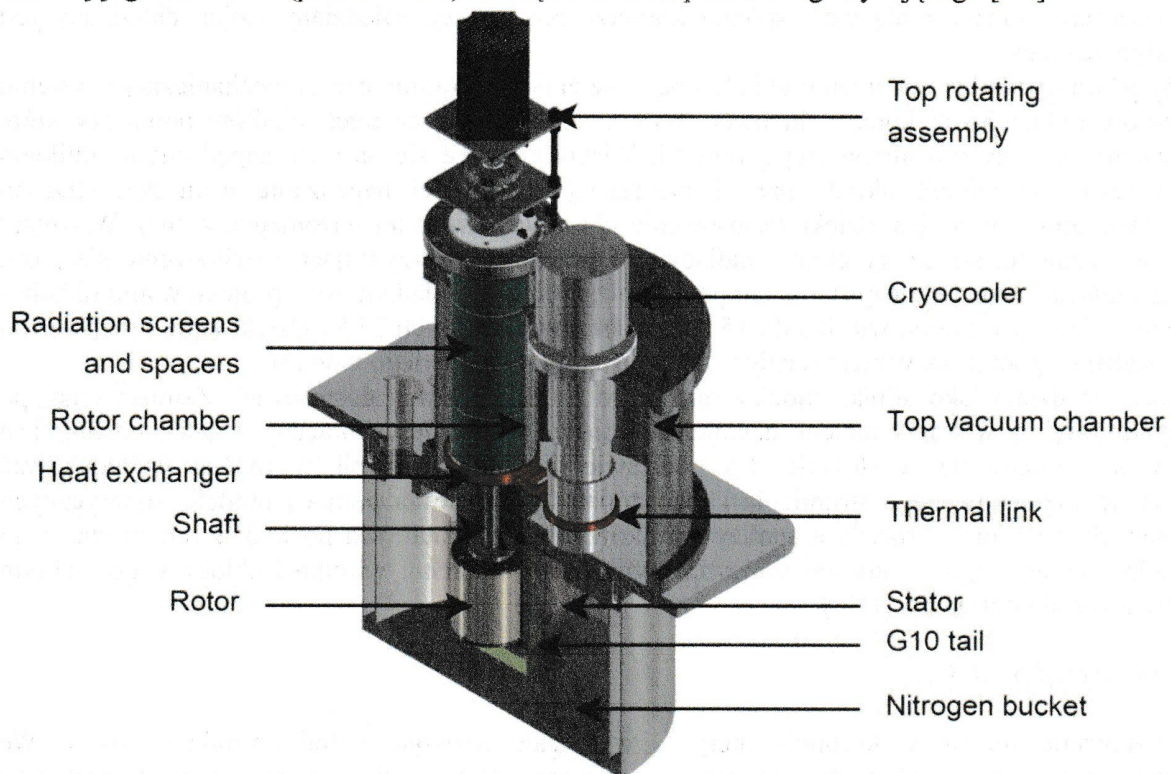


Rysunek 12. Rozkłady spuławkowanej indukcji magnetycznej (lewa strona) i prądów w stosie (prawa strona) po magnetyzacji i po demagnetyzacji [H9].

Wyniki analizy dobrze pokazują zmiany rozkładu prądu i sprzężonego strumienia w procesie demagnetyzacji. Na rysunku 12. pokazałem porównanie rozkładu strumienia magnetycznego i prądu w nadprzewodniku po magnetyzacji strumieniem o gęstości 6 T i po 500 cyklach strumienia demagnetyzującego o częstotliwości 50 Hz i amplitudzie wynoszącej ok. 2 T. Wyraźnie widać znaczące zmiany w obu rozkładach. Po magnetyzacji istnieją dwie pętle prądu nadprzewodzącego, świadcząc o niepełnej magnetyzacji. Mimo to zewnętrzny strumień magnetyczny jest stosunkowo silny. Po demagnetyzacji rozkład prądów jest chaotyczny, a strumień magnetyczny jest sprzężony wewnątrz stosu.



Rysunek 13. Zależność końcowej wielkości sprzężonego strumienia (lewa strona) i stałej czasowej jego obniżania (prawa strona) od częstotliwości pola demagnetyzującego [H9].



Rysunek 14. Przekrój układu eksperymentalnego do badań demagnetyzacji nadprzewodzących stosów w silniku elektrycznym [H13].

Analiza wykazała, że zewnętrzny, czyli możliwy do praktycznego wykorzystania, strumień magnetyczny zmniejsza się asymptotycznie z szybkością rosnącą wraz z częstotliwością do pewnej stałej wartości. Wartość końcowa wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości. Syntezę wyników pokazano na rysunku 13. Zastosowanie ekranów magnetycznych znacząco zwiększa końcową wielkość spuląpkowanego strumienia. Wpływ na szybkość demagnetyzacji ma jednak tylko w przypadku niższych częstotliwości, poniżej 10 Hz. Oba typy ekranów charakteryzują się podobną skutecznością, działają jednak w inny sposób. Ekran zamknięty wspiera stos poprzez zwiększenie objętości pułapkującej strumień. W trakcie demagnetyzacji rozkład prądów zmienia się głównie w ekranie, sam stos natomiast pozostaje chroniony. Otwarty ekran magnetyczny natomiast zatrzymuje propagację strumienia magnetycznego prostopadłego do powierzchni ekranu, zgodnie z przewidywaniami z [H1]. Praktyczne zastosowanie ekranów otwartych jest znacznie łatwiejsze niż zamkniętych, ze względu na trudności w produkcji odpowiednio dużych i właściwie ukształtowanych litych nadprzewodników.

Wstępne badania eksperymentalne dotyczące magnetyzacji ekranowanych stosów z [H11] opisano wcześniej. W [H3] przedstawiono wyniki modelowania i badań eksperymentalnych demagnetyzacji prostych prostopadłościennych stosów o różnych wymiarach. Badania prowadzone były z wykorzystaniem układu podobnego do opisanego w [H2]. Po magnetyzacji stos był obracany tak aby jego powierzchnia była prostopadła do osi cewki, która następnie była zasilana prądem przemiennym. Uzyskane wyniki potwierdzają asymptotyczny charakter procesu demagnetyzacji. Wykazały też, że stosunek wymiarów w prostopadłościennym stosie ma niewielki wpływ na szybkość i stopień demagnetyzacji wskazując na konieczność zastosowania innych metod ochrony. W celu eksperymentalnej analizy demagnetyzacji stosów o bardziej skomplikowanych kształtach w warunkach bliskich rzeczywistym warunkom pracy silnika powstał opisany w [H13] układ eksperymentalny. Przekrój układu pokazano na rysunku 14. Stosy umieszczone są w wirniku utrzymywanym w temperaturze ok. 15 K w komorze wypełnionej gazowym helem. Chłodzenie realizowane jest za pomocą chłodziarki kriogenicznej połączonej cieplnie z komorą helową i umieszczonej razem z nią we wspólnej komorze próżniowej. Miedziany stojan chłodzony jest ciekłym azotem.

Mój główny wkład w stworzenie układu obejmuje zaprojektowanie części mechanicznej i systemu ekranów radiacyjnych komory helowej. Wirnik składa się z czterech płatków pomiędzy które wsuwane są stosy o analizowanej geometrii. Wirnik znajduje się na wale napędzanym silnikiem krokowym. Szczelność układu przy jednoczesnej możliwości napędzania wału zewnętrznym silnikiem zapewniona jest dzięki zastosowaniu obrotowej uszczelki ferromagnetycznej. Wewnątrz komory znajdują się cztery ekranu radiacyjne i przekładki zatrzymujące rozchodzenie się gazu. Taka izolacja umożliwiła uzyskanie temperatur niższych niż zakładano przy projektowaniu układu - możliwe jest schłodzenie wirnika do 15 K zamiast spodziewanych 25 K. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie pomiarów w niemal całym zakresie temperatur ciekłego wodoru.

Układ nie działa jako silnik, chociaż można go do takiej pracy dostosować. Zamiast tego, po magnetyzacji z wykorzystaniem uzwojenia stojana, wirnik jest obracany i odczytywane jest napięcie indukowane w stojanie. Na podstawie uzyskanych wyników można wydedukować wielkość spuląpkowanego strumienia i jego zmiany w czasie za pomocą modeli numerycznych opisanych wcześniej. Procedura analizy wyników eksperymentalnych pochodzących ze starszego układu pomiarowego ze stosami umieszczonymi na powierzchni wirnika i chłodzonego ciekłym azotem została opisana w [H15].

Rozwój metod produkcji

Zastosowanie stosów w kształcie litery C wymagało rozwoju metod produkcji stosów. We wcześniej prowadzonych badaniach wykorzystywano stosy o płaskiej geometrii. Początkowo poszczególne taśmy lutowano¹³, bądź stosy utrzymywane były w całości przez zewnętrzne elementy mechaniczne¹⁴. Zastosowanie tych metod jest jednak niekorzystne w przypadku silnika elektrycznego. Lutowanie taśm zwiększa generację ciepła przez prądy wirowe i zmniejsza

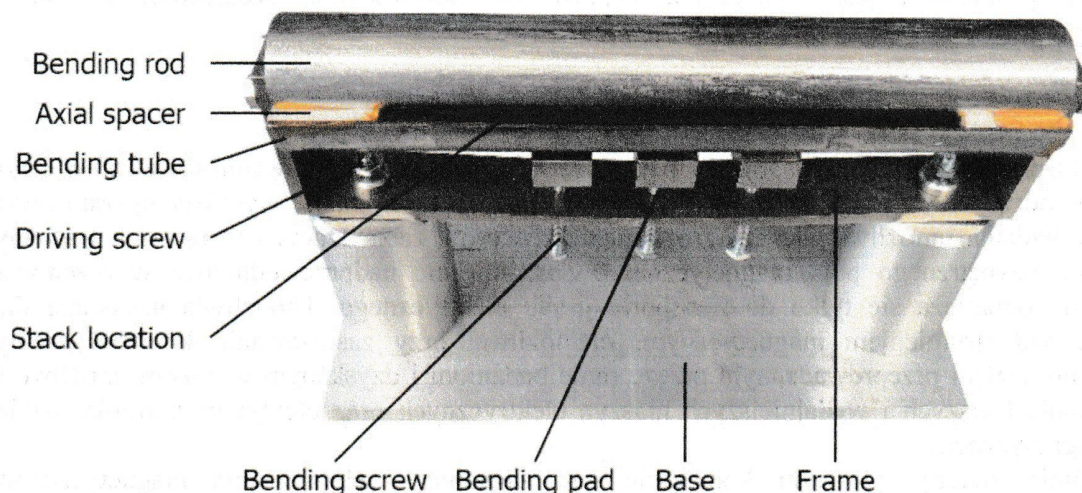
stabilność cieplną elementu. Wykorzystanie obejm jest niepraktyczne w przypadku stosów o bardziej skomplikowanych kształtach i może prowadzić do mechanicznego uszkodzenia taśm. W związku z tym konieczne okazało się zastosowanie materiałów łączących będących izolatorami elektrycznymi i umożliwiającymi kształtowanie stosu.

Początkowo analizowałem możliwość zastosowania *GE Varnish*, żywicy powszechnie stosowanej w urządzeniach kriogenicznych. Efekty okazały się jednak niesatysfakcjonujące ze względu na niewystarczającą zdolność penetracji szczelin pomiędzy taśmami. Dodatkowym problemem jest toksyczność materiału. Ostatecznie zdecydowałem się na zastosowanie dwuskładnikowej żywicy epoksydowej *Stycast 1266* charakteryzującej się dobrą penetracją i dużą wytrzymałością termiczną i mechaniczną.

By uzyskać pożądaną formę stosu i umożliwić prawidłową impregnację zaprojektowałem odpowiedni proces produkcyjny. Pierwszym etapem procesu jest przygotowanie fragmentów taśm o odpowiedniej długości. Stosy zastosowane w wirniku ASuMED mają długość 160 mm. Taśmy umieszczone są w zaprojektowanym przez mnie narzędziu pokazanym na rysunku 15. na wewnętrznej powierzchni rury gnącej. Zewnętrzne taśmy zabezpieczane są kaptonem by ułatwić ich późniejsze uwolnienie z urządzenia. Następnie rura gnąca przybliżana jest do zewnętrznej powierzchni pręta gnącego z wykorzystaniem śrub. Prawidłowy kształt stosu jest utrzymywany dzięki kształtkom umieszczonym na obu końcach rury gnącej.

Po zgięciu taśm stanowiąca formę górna część urządzenia z prętem, rurą i znajdującymi się pomiędzy nimi taśmami jest zdejmowana i przenoszona do komory próżniowej. Ponad taśmami zawieszony zostaje zbiornik ze świeżo zmieszanyimi składnikami żywicy. Następnie, powietrze zostaje odpompowane z komory próżniowej, a *Stycast* ulega odgazowaniu w próżni i jest wlewany do formy. Po częściowej penetracji przez żywicę komora jest ponownie wypełniana, a ciśnienie atmosferyczne dodatkowo wspiera wypełnianie przestrzeni pomiędzy taśmami. Żywica jest następnie utwardzana przez 2 godziny w piecu rozgrzanym do temperatury około 90°C.

Po utwardzeniu stos jest uwalniany z formy, ewentualny nadmiar żywicy zostaje usunięty, a boczne ściany stosu – szlifowane. Ostatni element procesu jest szczególnie ważny w kontekście redukcji oporów cieplnych. Jak opisano wcześniej, anizotropowość przewodności cieplnej sprawia, że ciepło jest dużo skuteczniej transportowane w powierzchni taśmy. Oznacza to, że większość ciepła będzie usuwana ze stosu właśnie przez ściany boczne, pomimo ich stosunkowo niewielkiej powierzchni.



Rysunek 15. Układ do gięcia taśmy zastosowany w produkcji stosów do wirnika silnika elektrycznego ASuMED [H12].

Opisany proces jest długotrwały i skomplikowany przez konieczność odgazowania żywicy i manipulowania nią w próżni. Dodatkowo, przy uwalnianiu stosu możliwe jest jego uszkodzenie bądź deformacja krawędzi. W związku z tym analizowałem również inne techniki kształtowania stosów i ich wpływ na zdolność pułapkowania strumienia magnetycznego. Ponieważ

wyprodukowanie stosu o płaskiej geometrii jest znacząco prostsze rozważałem możliwość kształtowania elementu po utwardzeniu żywicy. Podgrzany do około 150°C *Stycast* 1266 staje się elastyczny i po ponownym schłodzeniu utrzymuje swój kształt. W [H12] opisałem analizę zmian zdolności pułapkowania strumienia magnetycznego przez stos wywołane tym procesem.

Do przeprowadzenia analizy wyprodukowałem z szerokiej na 40-mm taśmy nadprzewodzącej płaski kwadratowy stos sklejonny *Stycastem*. Następnie, korzystając z opisanego wcześniej układu ze skanerem magnetycznym, zbadałem rozkład spułapkowanego strumienia magnetycznego. Zbadany stos doprowadziłem do kształtu litery C w narzędziu gnącym podgrzewanym do temperatury 150°C. Po uzyskaniu pożądanego kształtu stos był ponownie schładzany i nasycany strumieniem magnetycznym, który był mierzony. Ostatnim etapem było ponowne spłaszczenie stosu i pomiar spułapkowanego strumienia. Uzyskane wyniki eksperymentalne poddawano następnie analizie numerycznej umożliwiającej zbadanie zmian prądu krytycznego nadprzewodnika, a tym samym ocenę uszkodzeń nadprzewodnika w procesie kształtowania.

Uzyskane wyniki pokazały bardzo niewielki spadek prądu krytycznego po zgięciu nadprzewodnika. Ponowne prostowanie doprowadziło do znaczących uszkodzeń, prawdopodobnie spowodowanych zbyt niską temperaturą podczas procesu i delaminacją części taśm. Zaproponowana metoda gorącej prasy jest obiecująca i może znaleźć zastosowanie w kształtowaniu stosów nadprzewodzących. Bardzo mały spadek prądu krytycznego przy zginaniu pokazuje, że przy zachowaniu odpowiednich parametrów procesu (odpowiednia temperatura i siła) można stosunkowo łatwo uzyskać szeroki zakres kształtów stosów bez zmniejszania ich zdolności pułapkowania.

Inną możliwością produkcji stosów w kształcie litery C jest impregnacja bezpośrednio w wirniku, z wykorzystaniem jego elementów jako urządzeń gnących taśmę nadprzewodzącą. Takie podejście znacząco uprościłoby cały proces i zostało częściowo zastosowane przy ostatecznym montażu wirnika ASuMED. Ze względu na nieidealny kształt wyprodukowanych stosów konieczne było wypełnienie części wirnika *Stycastem*, by zachować mechaniczną stabilność elementu. W procesie tym kluczowe było zapewnienie kontaktu cieplnego między stosem, a wirnikiem. Zastosowałem tutaj połączenie indowe. W przyszłości możliwe będzie również lutowanie taśm nadprzewodzących do powierzchni wymiany ciepła płata wirnika, dobrze widocznej na rysunku 11. Drugim problemem jest trudność odgazowania *Stycastu* przy dużej objętości wirnika. Wymaga to długiego czasu, dużej komory próżniowej i systemu podgrzewającego wirnik dla przyspieszenia procesu. Ostatnim problemem jest konieczność zapewnienia odpowiedniej szczelności wirnika dla uniknięcia wylewania się żywicy podczas procesu.

Podsumowanie

Rezultaty przedstawionego osiągnięcia mają duże znaczenie w projektowaniu urządzeń o maszyn nadprzewodzących wykorzystujących taśmy z nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi. Opisane badania umożliwiły lepsze zrozumienie procesów zachodzących w taśmach poddanych działaniu zewnętrznego pola magnetycznego. Zastosowanie nadprzewodnictwa w przemyśle i nauce nie ogranicza się tylko do transportu prądu elektrycznego. Umożliwia uzyskanie dużej kontroli nad strumieniem magnetycznym, niemożliwej przy zastosowaniu konwencjonalnych rozwiązań. Dzięki przeprowadzonym przeze mnie badaniom i uzyskanym wynikom, możliwe jest zbudowanie lżejszych i wydajniejszych maszyn elektrycznych oraz efektywna kontrola rozkładu pola magnetycznego.

Szczególnie znaczące w tym kontekście jest zagadnienie ekranowania magnetycznego i pułapkowania strumienia. Przeprowadzone przeze mnie badania ekranowania magnetycznego znajdują zastosowanie w akceleratorze NICA budowanym w ZIBJ. Również prace nad pułapkowaniem strumienia magnetycznego przyniosły wymierne efekty - konstrukcja silnika ASuMED została zakończona, łącznie z wkładem moim i mojej grupy w postaci stosów nadprzewodzących służących jako magnesy spułapkowanego strumienia w wirniku. Otwarte pozostają dalsze drogi badań, w szczególności nad metodami produkcji stosów oraz redukcji demagnetyzacji przez zastosowanie nadprzewodzących ekranów magnetycznych.

Bibliografia

1. A. Smirnov, G. Dorofeev, V. Drobin, E. Kulikov, H. Malinowski: *Experimental study of high-temperature superconductor shield for electron cooling system*, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016
2. R. Pecher, M.D. McCulloch, S.J. Chapman, L. Prigozhin, C.M. Elliott: *3D-modelling of bulk type-II superconductors using unconstrained H-formulation*, Institute of Physics Conference Series, 2003
3. X. Zhang, Z. Zhong, J. Geng, B. Shen, J. Ma, C. Li, H. Zhang, Q. Dong, T. A. Coombs: *Study of Critical Current and n-Values of 2G HTS Tapes: Their Magnetic Field-Angular Dependence*, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2018
4. IATA: *Tourism Economics Air Passenger Forecasts*, 2020
5. Komisja Europejska: *Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation*, 2020
6. ENSTROJ: *EMRAX 207 Technical Data Table*, 2014
7. A. Patel, A. Baskys, T. Mitchell-Williams, A. McCaul, W. Coniglio, J. Hänisch, M. Lao, B.A. Głowacki: *A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape*, Superconductor Science and Technology, 2018
8. T. Mitchell-Williams, A. Patel; A. Baskys; S. Hopkins; A. Kario; W. Goldacker; B. A. Głowacki: *Toward uniform trapped field magnets using a stack of Roebel cable offcuts*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016
9. M. Bonura, C. Senatore: *High-field thermal transport properties of REBCO coated conductors*, Superconductor Science and Technology, 2014
10. M. Bonura, C. Senatore: *Transverse Thermal Conductivity of REBCO Coated Conductors*, Superconductor Science and Technology, 2015
11. A. Campbell, M. Baghdadi, A. Patel, D. Zhou, K. Huang, Y. Shi, T. Coombs: *Demagnetisation by crossed fields in superconductors*, Superconductor Science and Technology, 2017
12. A. Dadhich, E. Pardo: *Modeling cross-field demagnetization of superconducting stacks and bulks for up to 100 tapes and 2 million cycles*, Scientific Reports, 2020
13. A. Baskys, A. Patel, S. Hopkins, V. Kalitka, A. Molodyk, B.A. Głowacki: *Self-Supporting Stacks of Commercial Superconducting Tape Trapping Fields up to 1.6 T Using Pulsed Field Magnetization*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014
14. A. Patel, S. Hahn, J. Voccio, A. Baskys, S. Hopkins, B.A. Głowacki: *Magnetic levitation using a stack of high temperature superconducting tape annuli*, Superconductor Science and Technology, 2016



5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej:

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora kontynuowałem część prac badawczych wspólnie z Politechniką Wrocławską w kontekście projektu systemu odzyskiwania egzergii skroplonego gazu ziemnego oraz analiz dokonywanych dla Instytutu Badań Ciężkich Jonów GSI. Następnie w ramach pracy w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych prowadziłem działalność projektową i badawczą niezawartą w osiągnięciu habilitacyjnym. Prace badawcze, którymi zajmowałem się na Uniwersytecie w Cambridge zostały zawarte w opisie osiągnięcia naukowego, w niniejszej sekcji pokrótce je streszczam. Obecnie pracuję w Europejskim Laboratorium Fizyki Cząstek CERN, gdzie kontynuuję prace badawcze nad zastosowaniami nadprzewodników wysokotemperaturowych.

System odzyskiwania zimnej egzergii z regazyfikacji LNG

Podczas studiów doktoranckich rozpocząłem prace nad projektem systemu odzyskiwania egzergii skroplonego gazu ziemnego (LNG), które kontynuowałem również po uzyskaniu stopnia doktora. System taki produkuje energię mechaniczną poprzez wykorzystanie LNG regazyfikowanego w terminalu przyjmującym jako dolnego źródła ciepła w układzie silnika cieplnego. W pracach [P2] i [D5] zaproponowałem zastosowanie wody morskiej jako górne źródło ciepła. Innowacyjną cechą układów opisanych we wspomnianych publikacjach jest wykorzystanie mieszanki węglowodorów i gazów szlachetnych jako czynnika roboczego w zmodyfikowanym obiegu Rankine'a.

W najczęściej proponowanych w literaturze układach odzysku zimnej egzergii wykorzystywany jest obieg Rankine'a z czystym węglowodorem jako czynnikiem roboczym (Organic Rankine Cycle – ORC). Dzięki temu uzyskiwana jest wysoka sprawność cieplna procesu. Uzyskany w takim procesie gaz ziemny ma jednak najczęściej ciśnienie atmosferyczne i musi zostać ponownie sprężony, by mógł być wykorzystywany w sieci przesyłowej. Wymaga to dużych ilości energii mechanicznej, nierzadko przewyższającej deklarowaną produkcję z ORC. Większość autorów nie bierze tego procesu pod uwagę w obliczeniach sprawności. W celu uzyskania najwyższej sprawności egzergetycznej i energetycznej konieczna jest regazyfikacja LNG pod wysokim ciśnieniem. Typowe ciśnienie w sieci przesyłowej wynosi 8,5 MPa. Dla czystego metanu i większości mieszanin gazu ziemnego oznacza to, że izobara odparowania znajduje się w obszarze nadkrytycznym.

Najwyższa sprawność egzergetyczna w podobnych procesach uzyskiwana jest, gdy wymiana ciepła zachodzi przy minimalnej różnicy temperatur. W związku z tym konieczny jest dobór czynnika, który umożliwi przybliżenie krzywych skraplania czynnika i odparowania LNG. Zastosowanie czynnika o podobnym składzie jak przetwarzany gaz ziemny (jak robione jest to często w procesach skraplania gazu) nie jest praktyczne. Właściwości takiego czynnika wymuszałyby zastosowanie ekstremalnie wysokiego ciśnienia w parowniku do uzyskania mocy mechanicznej uzasadniającej zastosowanie układu. Konieczne jest zatem zastosowanie innej mieszanki. W pracy [P2] opisano zastosowanie mieszaniny etanu i kryptonu pracującej w cyklu inspirowanym cyklem chłodziarki absorpcyjnej. Cykl ten wsparty był propanowym ORC z którego odbierana była część ciepła do cyklu absorpcyjnego.

W pracy [D5] opisano cykl zmodyfikowany tak, aby po rozdzieleniu czynników wykorzystywać oba strumienie do odbioru zimnej egzergii z LNG w różnych zakresach temperatury. W ten sposób wyeliminowano potrzebę zastosowania dwóch oddzielnych cykli i uproszczono cały układ jednocześnie zwiększając jego sprawność. Mój udział w obu pracach obejmował stworzenie koncepcji układu i przygotowanie jego modelu numerycznego oraz część późniejszej analizy wyników. Uzyskane wyniki pokazują bardzo korzystne parametry sprawności i ogólnego bilansu mocy w porównaniu do innych cykli odzysku zimnej egzergii. Praktyczne zastosowanie podobnych układów umożliwiłoby eliminację zużycia gazu ziemnego na odparowanie dostarczonego LNG, co przy obecnie stosowanych układach wymaga około 1% dostarczonego surowca. Miałoby to znaczące konsekwencje ekonomiczne i ekologiczne.

Analizy elektromagnetyczne i cieplne kabli nadprzewodzących dla linii bocznikującej akceleratora FAIR

W ramach pracy w projekcie *Współpraca w ramach Krajowego Konsorcjum FEMTOFIZYKA w budowie, uruchomieniu i działaniu Europejskiego Ośrodka Badań Antyprotonami i Jonami- Current Lead Boxes* dokonywałem analiz cieplnych i elektromagnetycznych szynoprzewodów, które zostaną zastosowane w liniach bocznikujących akceleratora FAIR. W liniach znajdują się 4 pary szynoprzewodów zasilających poszczególne grupy magnesów akceleratora. Szynoprzewody wykonane są z przewodów z nadprzewodnikiem niskotemperaturowym NbTi owiniętych wokół miedzianej rurki, tworząc w ten sposób kabel nuklotronowy (nazwa pochodzi od Nuklotronu, akceleratora w ZIBJ gdzie pierwszy raz zastosowano taką architekturę). Para przewodów znajduje się w stalowej osłonie. Dla zmniejszenia naprężeń cieplnych przewodów przy końcach kriostatów wygięty jest w kształt litery Ω tworząc dylatację.

W publikacji [P3] zawarłem opis problemów mechanicznych występujących w linii bocznikującej ze szczególnym uwzględnieniem deformacji kabli pod wpływem siły Lorentza oraz wibracji wywoływanych przepływem helu w wąskich kanałach i opływających elementy wymienników ciepła. W pracy [P7] opisałem numeryczną analizę produkcji ciepła w stalowej osłonie przez prądy wirowe indukowane podczas pracy akceleratora. Uzyskane wyniki pokazały, że ilość produkowanego ciepła jest bardzo niewielka i może zostać dodatkowo zredukowana przez odpowiednie ukształtowanie osłony.

Prace [D2] i [D4] zawierają analizy elektromagnetyczne konieczne do wyznaczenia parametrów szynoprzewodu w kontekście działania obwodu elektrycznego całego akceleratora. W [D2] wyznaczono pojemność elektryczną szynoprzewodu w zależności od rozstawu pary szynoprzewodów. Wyniki przeprowadzonych przeze mnie obliczeń numerycznych okazały się zgodne z wynikami eksperymentów i pozwoliły na wyznaczenie optymalnego rozstawu. W [D4] wyznaczyłem indukcyjności własne i wzajemne szynoprzewodów w linii. Szczególnym wyzwaniem było wyznaczanie indukcyjności dylatacji o skomplikowanym kształcie.

W publikacji [D8] opisałem analizę numeryczną mającą na celu wyznaczenie generacji ciepła w kablu nadprzewodzącym w sytuacji z szybko zmieniającą się wielkością przepływu prądu (ok. 26 kA/s w cyklu trójkątnym o częstotliwości 1 Hz) stanowiącym scenariusz treningowy magnesów akceleratora. Przeanalizowałem możliwość utraty nadprzewodnictwa w przypadku chłodzenia ciekłym helem przepływającym w rurce chłodzącej. Uzyskane wyniki wykazały niewielki wzrost temperatury kabla, niewystarczający jednak by stanowił zagrożenie dla stabilności cieplnej kabla. Z pracą [D8] powiązana jest również publikacja [D3], w której opisałem wpływ gęstości siatki numerycznej na uzyskiwane wyniki analiz.

Częścią mojej pracy dla wspomnianego projektu było również projektowanie układu elektrycznego wczesnego wykrywania utraty nadprzewodnictwa. Odbywa się to poprzez odczyt różnicy potencjałów na długości kabla, która bardzo szybko rośnie w przypadku przejścia nadprzewodzącego. Innym aspektem mojej pracy była analiza przepływów ciekłego helu w linii.

Prace projektowe i badawcze w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej

Współpracę ze Zjednoczonym Instytutem Badań Jądrowych w Dubnej rozpocząłem już w trakcie studiów magisterskich. Moja praca magisterska dotycząca badań zamkniętych ekranów magnetycznych i wpływu częstotliwości zewnętrznego pola magnetycznego na jakość ekranowania wpisywała się w kontekst prowadzonych tam prac i zaowocowała publikacją [P1]. W trakcie studiów doktoranckich odbyłem trzymiesięczny staż w tymże ośrodku, gdzie kontynuowałem badania nad ekranami magnetycznymi. Część z nich opisałem w pracy [P4]. Badania nad zastosowaniami elementów nadprzewodzących stanowiące jeden z elementów osiągnięcia naukowego prowadziłem w czasie mojego rocznego pobytu w ZIBJ w roku 2018. Wyniki wówczas uzyskane stały się podstawą publikacji [H1], [H16] i [H17] opisanych w poprzedniej sekcji.

Podczas mojej pracy w ZIBJ, oprócz opisanych w osiągnięciu habilitacyjnym badań, prowadziłem również prace badawcze związane ze stworzeniem nowego kabla z nadprzewodnikiem wysokotemperaturowym do wykorzystania w magnesach przyszłych akceleratorów i detektorów. Prowadziłem również wstępne analizy możliwości zastosowania nadprzewodnikowego zasobnika energii do redukcji zużycia energii elektrycznej przez akcelerator. Brałem też udział w projektowaniu analizatora spektrometru neutronowego.

W ramach analiz potrzebnych do zaprojektowania kabla nadprzewodzącego prowadziłem pomiary prądu krytycznego taśm z BSCCO w ciekłym azocie wykorzystując układ sond Halla. Metoda odczytu prądu krytycznego jest podobna do analiz ekranowania magnetycznego i działa na tej samej zasadzie – badając gradient pola magnetycznego za taśmą i stopień redukcji zewnętrznego pola magnetycznego można obliczyć wartość prądu ekranującego i tym samym prąd krytyczny. Opisane badania prowadzone były, podobnie jak analizy ekranowania magnetycznego, w ramach projektu NICA.

Oprócz budowanego akceleratora NICA, drugim dużym obiektem na terenie ZIBJ jest impulsowy reaktor jądrowy IBR-2 umożliwiający uzyskanie strumienia neutronów o bardzo dużej gęstości poprzez krótkotrwałe, cykliczne doprowadzanie materiału rozszczepialnego do stanu krytycznego. W trakcie mojego pobytu w ZIBJ zaangażowany byłem w projektowanie spektrometru nieelastycznego rozpraszania neutronów, który ma zastąpić obecnie działający spektrometr NERA pracujący z wykorzystaniem strumienia neutronów z IBR-2. Mój udział w projekcie obejmował zaprojektowanie rozkładu płytek grafitowych w analizatorze spektrometru, by odpowiednio kontrolować trajektorię rozpraszanych neutronów i umożliwić prowadzenie pomiaru czasu przelotu. Prowadziłem również analizy cieplne elementów spektrometru wymagających schładzania do niskich temperatur, w szczególności berylowego filtra.

Aktywność badawcza na Uniwersytecie w Cambridge

W roku 2019 rozpocząłem pracę na Uniwersytecie w Cambridge w Grupie Nadprzewodnictwa Stosowanego i Kriogeniki na Wydziale Materiałoznawstwa i Metalurgii. W ramach mojej pracy tam brałem udział w dwóch projektach badawczych związanych z zastosowaniem stosów wykonanych z taśm nadprzewodzących w lotniczym silniku elektrycznym – ASuMED (*Advanced Superconducting Motor Demonstrator* - nr 7231119 w programie Horyzont 2020) i *Development of superconducting composite permanent magnets for synchronous motors: an enabling technology for future electric aircraft*, nr EP/P000738/1 z EPSRC. Moją działalność w ramach obu projektów szeroko omówiłem w opisie osiągnięcia naukowego. Ogólny opis silnika i zastosowanych stosów znajduje się pracach [H4], [H6] i [H10].

Częścią mojej pracy było przeprowadzenie analizy termicznej stosów nadprzewodzących i stworzenie procedury obliczeniowej umożliwiającej wyznaczenie parametrów przepływu ciepła w silniku elektrycznym. Szczególnym wyzwaniem było zbadanie anizotropowej przewodności cieplnej w stosach o specyficznym kształcie. Uzyskanie wyniku badań opisałem w [H5] i [H8]. Opracowana przeze mnie procedura znalazła zastosowanie w pracy [H3] i w projektowaniu kotwicy cieplnej oraz kształtu stosu do zastosowania w silniku ASuMED. W ramach badań przewodności cieplnej stosów stworzyłem również układ eksperymentalny do jej pomiaru w temperaturze 77 K i powyżej. Przeprowadzone pomiary potwierdziły wartości uzyskane analitycznie.

Byłem również odpowiedzialny za przygotowanie i wsparcie opracowania modeli numerycznych uwzględniających anizotropowość i deformacje rozkładu krytycznej gęstości prądu w taśmach nadprzewodzących. Analizowałem zachowanie stosów o różnych geometriach, poddanych działaniu zewnętrznych pól magnetycznych o zróżnicowanym kierunku i sile. Dokonywałem również eksperymentalnego potwierdzenia uzyskanych wyników numerycznych. Prace koncentrujące się na tej tematyce to [H2], [H3], [H7], [H11], [H14] i [H15].

W toku prowadzonych badań ustalono, że zasadniczym problemem utrudniającym zastosowanie stosów w silniku elektrycznym jest zjawisko demagnetyzacji. Polega na redukcji spulapkowanego strumienia magnetycznego podczas interakcji pomiędzy stosem, a składnikiem zewnętrznego

strumienia magnetycznego prostopadłym do spulapkowanego. W wyniku tej interakcji układ prądów w stosie zniekształca się i pętla prądu utrzymująca spulapkowany strumień magnetyczny zanika. W ramach mojej pracy badałem metody redukcji tego zjawiska, w szczególności przez zastosowanie ekranów magnetycznych i odpowiedni dobór architektury stosu (prace [H3], [H9] i [H11]). Inną metodą, zastosowaną w wirniku silnika ASuMED jest ochrona stosu poprzez elementy wirnika. W pracy [H13] opisałem układ eksperymentalny do badania zachowania stosu w warunkach pracy nadprzewodzącego silnika.

Najważniejszym w kontekście projektu ASuMED wynikiem mojej pracy było opracowanie metody produkcji stosów w kształcie litery C i zastosowanie jej do stworzenia 16 stosów długości 160 mm znajdujących się obecnie w wirniku demonstratora, gdzie będą pracować jako magnesy spulapkowanego strumienia. Każdy ze stosów zawiera 70 warstw taśmy nadprzewodzącej. Metoda produkcji opiera się na zastosowaniu żywicy *Stycast* 1266 do próżniowej impregnacji zgiętych taśm. Ulepszona metoda produkcji z wykorzystaniem gorącej prasy została opisana w pracy [H12].

Praca naukowa w CERN

Obecnie pracuję w grupie SCD (*Superconductors and Devices*) w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN. Zostałem zaangażowany w badania związane z projektem nadprzewodzącego kabla zasilającego Wielki Zderzacz Hadronów (*Large Hadron Collider – LHC*) umieszczonego w elastycznym kriostacie, zwanego SC-link. Projekt ten wpisuje się w kontekst modernizacji LHC w ramach projektu *High Luminosity LHC (HL-LHC)*. HL-LHC ma na celu zwiększenie świetności LHC i rozwój różnych aspektów technologii akceleratorowej. SC-Link ma być jednym z pierwszych wielkoskalowych projektów, w których zastosowane zostaną kable z MgB₂. Kabel będzie składał się z mniejszych elementów zasilających poszczególne sekcje magnesów akceleratora.

Będzie to struktura skomplikowana pod względem elektromagnetycznym, cieplnym i mechanicznym. Dodatkowym wyzwaniem jest fakt umieszczenia kabla w ograniczonej przestrzeni w pobliżu tunelu LHC i konieczność stworzenia doprowadzeń prądowych z nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi o skomplikowanej geometrii. Moje zaangażowanie w projekt polega na prowadzeniu analiz cieplnych całego układu i jego poszczególnych elementów oraz zaprojektowanie i wyprodukowanie doprowadzeń prądowych z nadprzewodnikiem wysokotemperaturowym.

Głównym aspektem analizy cieplnej którym się zajmowałem jest przewidywanie dynamiki chłodzenia kabla oraz planowanie dalszych prac eksperymentalnych mających na celu wybór najlepszej architektury kabla i elastycznego kriostatu. Przeprowadzona analiza musi brać pod uwagę żebrowany kształt kriostatu oraz obecność licznych warstw i segmentów kabla. Uzyskane do tej pory wyniki są zgodne z danymi pochodzącymi z testów chłodzenia SC-linku. Porównanie wyników umożliwiło wyznaczenie niektórych parametrów wymiany ciepła, które są niemożliwe bądź trudne do obliczenia w sposób analityczny, takich jak opory cieplne pomiędzy żebrami elastycznego kriostatu i deformującym się kablem.

W kontekście doprowadzeń prądowych prowadzę badania analityczne i eksperymentalne. Jednym z realizowanych przeze mnie zadań jest dobór długości chłodzonych gazowym helem łączników miedzianych. Dzięki wykorzystaniu metod wytwarzania addytywnego możliwe jest uzyskanie skomplikowanych kształtów i optymalizacja wymiany ciepła pomiędzy materiałem łącznika a chłodziwem. Modelowanie takiego układu jest jednak sporym wyzwaniem. Wykorzystując trójwymiarowy model numeryczny wyznaczyłem charakterystykę strat ciśnienia w łączniku w funkcji temperatury i przepływu helu. Uzyskane wyniki wykorzystałem następnie w modelu analitycznym co, w połączeniu z wyznaczeniem generacji ciepła w łączniku, umożliwiło dobór optymalnej długości.

Prowadzone przeze mnie badania eksperymentalne obejmują pomiary właściwości elektrycznych taśm nadprzewodzących w kontekście zastosowania ich w doprowadzeniach prądowych. Pomiarów dokonuję na pojedynczych taśmach i na modelach kabli. Pomiary pojedynczych taśm dotyczą prądu

krytycznego produktów różnych producentów. Dla tych pomiarów zaprojektowałem układ umożliwiający pomiar 8 taśm w jednym cyklu schładzania. Badam również wpływ wysokiej temperatury na degradację taśmy oraz analizuję efekty działania różnych czynników (temperatury, siły nacisku, czasu nagrzewania) na jakość połączeń lutowanych pomiędzy taśmami nadprzewodzącymi. W celu prowadzenia analizy uzyskanych danych stworzyłem algorytm obliczeniowy zdolny do wyznaczania parametrów prądu krytycznego na podstawie skomplikowanych charakterystyk prądowo-napięciowych. Osiągane jest to poprzez eliminację części charakterystyki zawierającej opory liniowe i normalizację prądu krytycznego względem rosnącej podczas pomiaru temperatury taśmy.

Modele kabli to cylindryczne miedziane przewody plecione z nawiniętą pewną liczbą taśm nadprzewodzących w jednej lub większej liczbie warstw. Badania prowadzone na takich modelach mają na celu zbadanie rozptyłu prądu pomiędzy taśmami oraz znalezienie procesu produkcji zakończeń kabli minimalizującego przepływ prądu przez elementy miedziane. Rozptył prądu wywołany jest głównie niejednorodnością oporów kontaktu pomiędzy poszczególnymi taśmami, a materiałem wypełniającym zakończenie. W tej sytuacji obserwowane są interesujące zachowania, gdy w pewnych warunkach bardziej korzystny energetycznie jest przepływ prądu w różnych kierunkach przez niektóre taśmy. Zachowanie takie obniża stabilność cieplną kabla i może doprowadzić do jego przegrzania (szczególnie w warunkach chłodzenia gazowym helem) i wyjścia ze stanu nadprzewodnictwa.

W ramach przygotowań do produkcji pełnowymiarowego kabla biorę również udział w projektowaniu urządzeń koniecznych w tym procesie. Obecnie projektuję automatyczny system wizualnej kontroli jakości dostarczanych szpul taśmy nadprzewodzącej umożliwiający wydawanie określonej długości taśmy i rejestrację ilości taśmy na poszczególnych szpulach. Brałem również udział w automatyzacji układu pomiarowego kompleksu kriostatów FRESCA.

Parametry naukometryczne dorobku naukowego

Łączna liczba publikacji i cytowań według baz danych:

- Scopus: **28** publikacji, **111** cytowań (45 autocytowań), Indeks Hirscha: **5**
- Publons (Web of Science): **31** publikacji, **100** cytowań, Indeks Hirscha: **5**
- Google Scholar: **37** publikacji, **135** cytowań (51 autocytowań), Indeks Hirscha: **6**

Sumaryczny Impact Factor: **39,621**, w tym:

- publikacje wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego: **21,371**
- publikacje opublikowane po ukończeniu studiów doktoranckich niewchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego: **8,208**
- publikacje opublikowane przed ukończeniem studiów doktoranckich: **10,042**

Sumaryczna punktacja wg listy MNiSW: **1734**, w tym:

- publikacje wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego: **975**
- publikacje opublikowane po ukończeniu studiów doktoranckich niewchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego: **372**
- publikacje opublikowane przed ukończeniem studiów doktoranckich: **387**

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę:

W ramach mojej pracy dydaktycznej przygotowałem materiały do prowadzonych przeze mnie w języku angielskim kursów *Applied Superconductivity* i *Thermonuclear Power Generation*. Kurs *Applied Superconductivity* to seria 7 wykładów, w trakcie których omawiałem fizyczne podstawy zjawiska nadprzewodnictwa, wyzwania techniczne związane z jego stosowaniem i przykłady zastosowań. Szczególny nacisk położyłem na współczesne wielkoskalowe urządzenia wykorzystujące nadprzewodniki – akceleratory cząstek i reaktory termojądrowe. Opisałem rodzaje

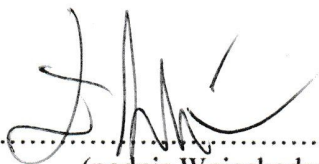
magnesów stosowanych w tych urządzeniach oraz podstawowe informacje dotyczące ich konstrukcji. Przedstawiłem również przykłady wykorzystania nadprzewodnictwa w energetyce i technice kwantowej.

Na kurs *Thermonuclear Power Generation* składa się 14 wykładów, 7 zajęć ćwiczeniowych i 7 zajęć seminaryjnych. Materiał kursu podzieliłem na 3 grupy tematyczne – fizyczne podstawy zjawiska fuzji, inżynierskie rozwiązania w reaktorach termojądrowych opartych na magnetycznym pułapkowaniu plazmy i systemy kriogeniczne w reaktorach na przykładzie tokamaka ITER. Kurs wzbogaciłem wykładem dotyczącym fizyki, konstrukcji i historii broni jądrowej i termojądrowej. W trakcie zajęć seminaryjnych zadaniem studentów było przygotowanie prezentacji dotyczących wybranych aspektów fuzji termojądrowej, w szczególności dotyczące fuzji jądrowej jako źródła energii gwiazd, systemów pułapkowania inercyjnego, fuzorów, historii badań nad zjawiskami jądrowymi i potencjalnego wpływu energetyki termojądrowej na stabilność systemu energetycznego.

Kolejnym aspektem mojej działalności dydaktyczno-popularyzatorskiej był trzykrotny udział jako wykładowcy podczas European Course of Cryogenics realizowanego przed Uniwersytet Techniczny w Dreźnie, Politechnikę Wrocławską i Norweski Uniwersytet Techniczny w Trondheim. Podczas edycji kursu w 2016 prowadziłem wykład *Introduction to Superconductivity*, natomiast podczas edycji 2017 i 2019 prowadziłem dwa wykłady – *Basics of Superconductivity* i *Applied Superconductivity*. W pierwszym wykładzie opisywałem podstawy fizyczne nadprzewodnictwa i właściwości tego stanu. W drugim wykładzie opisywałem przykłady konkretnych zastosowań, podobnie jak w pełnym kursie *Applied Superconductivity*.

W trakcie mojej pracy w ZIBJ w Dubnej brałem udział w programie stażowym Bogoliubowa-Infelda jako prowadzący. Opracowałem serię ćwiczeń związanych z moją działalnością w ZIBJ, które następnie przeprowadziłem wraz ze studentem studiów magisterskich Błażem Skibą. Wyniki przeprowadzonych badań zostały opublikowane jako praca [D6] oraz stały się podstawą rozprawy magisterskiej pana Skiby, w przygotowaniu której brałem udział jako konsultant. Podczas pracy na Uniwersytecie w Cambridge współpracowałem z mgr. inż. Krystianem Machajem, uczestnikiem studiów doktoranckich na Politechnice Wrocławskiej, co zaowocowało publikacjami [H11] i [H13]. Również obecnie wspieram studentów studiów doktoranckich współpracujących z moją grupą w CERN poprzez pomoc w przygotowaniu materiałów eksperymentalnych.

Częścią mojego wkładu w popularyzację nauki jest pomoc w przygotowaniu materiałów promocyjnych oraz fragmentów raportów z działalności konsorcjum ASuMED. Opisałem swój wkład w realizację projektu – produkcję i modelowanie stosów nadprzewodzących. Przeprowadziłem również otwarte seminarium CERN na ten temat. Innym przykładem jest mój udział w SAIL – międzynarodowym projekcie mającym na celu zwiększanie świadomości ekologicznej w państwach basenu Morza Bałtyckiego, gdzie przedstawiłem możliwości zmniejszenia wpływu akceleratorów cząsteczkowych na środowisko naturalne oraz pozytywne efekty rozwoju tej technologii. W szczególności uwzględniłem redukcję zużycia energii poprzez zastosowanie układów SMES oraz zwiększenie dostępności i technicznej przydatności nadprzewodników dzięki dużemu popytowi generowanemu na nie przez realizowane projekty fizyki wysokich energii.


.....
(podpis Wnioskodawcy)